



Filipe Eduardo Máximo e Sousa

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Uma Proposta Metodológica para Seleção de Parâmetros de Projeto com Base no Conflito com os Constrangimentos - Aplicação a Produtos Únicos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientadores: Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins
Professor Associado, FCT-UNL

Vogais: Doutor João Manuel Vicente Fradinho
Professor Auxiliar, FCT-UNL
Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos
Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho, 2021

Filipe Eduardo Máximo e Sousa
Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Uma Proposta Metodológica para Seleção de
Parâmetros de Projeto com Base no
Conflito com os Constrangimentos - Aplicação
a Produtos Únicos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientadores: Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins
Professor Associado, FCT-UNL

Vogais: Doutor João Manuel Vicente Fradinho
Professor Auxiliar, FCT-UNL
Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Julho, 2021

[Uma Proposta Metodológica para Seleção de Parâmetros de Projeto com Base no Conflito com os Constrangimentos – Aplicação a Produtos Únicos]

Copyright © [Filipe Eduardo Máximo e Sousa], Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado à minha família

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores Professor Doutor António Mourão e Professor Doutor António Gabriel por terem possibilitado a realização deste trabalho. A disponibilidade de ambos para discussões sobre o tema, maioria das vezes fora de horas, permitiu que pudesse realizar o trabalho paralelamente à minha atividade profissional.

Quero também agradecer aos meus colegas da empresa Eurohidra, pelo conhecimento que adquiri nos últimos anos e que contribuiu para a realização do presente trabalho.

Aos meus pais, agradeço por me terem possibilitado um percurso académico e por sempre me apoiarem e incentivarem para prosseguir com os estudos e terminar o mestrado.

À minha namorada e companheira de vida Gabriella, agradeço o apoio incondicional durante este complicado período, em que os dias eram divididos entre a minha atividade profissional e a realização deste trabalho e pelo incentivo que me deu forças para terminar este trabalho.

Por fim, agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, por me ter proporcionado um percurso académico com todos os meios necessários para adquirir conhecimentos técnicos e científicos e capacidades sociais, que me prepararam para a minha atividade profissional.

Resumo

A atividade de projeto em engenharia é desafiante. Ao longo desta atividade, o projetista tem de tomar decisões com impacto direto no sucesso do projeto. Para o projeto de determinados produtos, como é o caso dos produtos únicos, existe a necessidade de se tomarem decisões em fases nas quais a informação sobre o produto é ainda muito reduzida.

Têm sido desenvolvidas e sugeridas ferramentas para apoio do processo de projeto, incluindo as tarefas que envolvem a tomada de decisão, como é o caso da Teoria Axiomática de Projeto. Esta teoria baseia-se nos axiomas da independência e da informação, que definem os critérios de seleção de soluções de projeto. A aplicação do axioma da informação apenas é possível na presença de dados das soluções alternativas que se estão a considerar. Para os produtos únicos, estes dados são, na maioria das vezes, inexistentes ou inviáveis de recolher na fase preliminar de tomada de decisão, particularmente, em aspetos conceptuais do projeto. Pretende-se apresentar neste trabalho, uma proposta metodológica para a seleção de parâmetros de projeto que sirva de alternativa ao axioma da informação.

O processo de projeto é muito condicionado pelos constrangimentos existentes, tendo estes uma grande influência no resultado do projeto. A metodologia proposta consiste na seleção de parâmetros de projeto, entre um conjunto de alternativas consideradas, através da análise do grau de conflito que cada proposta de solução apresenta face aos constrangimentos. É apresentado um caso para o qual é aplicada a metodologia proposta, mostrando que a mesma constitui uma efetiva ajuda ao desenvolvimento de projeto.

Palavras-chave: Tomada de decisão em engenharia; Seleção de parâmetros de projeto; Teoria Axiomática de Projeto; Constrangimentos; Produtos Únicos.

Abstract

The engineering design activity is challenging. Throughout this activity, the designer has to make decisions that have a direct impact on the project's success. For the design of certain products, such as unique products, there is a need to take decisions in phases in which information about the product is still very limited.

Tools have been developed and suggested to support the design process, including tasks that involve decision making, such as Axiomatic Design. This theory is based on the axioms of independence and information, which define the criteria for selecting design solutions. The application of the information axiom is only possible in the presence of data from the alternative solutions being considered. For unique products, these data are, in most cases, non-existent or impossible to collect in the preliminary phase decisions, particularly in conceptual aspects of the project. It is intended to present in this work, a methodological proposal for the selection of design parameters that serves as an alternative to the information axiom.

The design process is heavily conditioned by existing constraints, having a great influence on the design result. The proposed methodology consists in the selection of project parameters, among a set of considered alternatives, through an analysis of the degree of conflict that each solution presents to the existing constraints. It is presented a case for which is applied the proposed methodology, showing that it constitutes an effective help to the development of the project.

Keywords: Engineering decision making; Selection of design parameters; Axiomatic Design; Constraints; One-off Products.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
NOMENCLATURA.....	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. PROJETO DE PRODUTOS ÚNICOS	3
2.1. PROJETO EM ENGENHARIA	3
2.1.1. <i>Processo de projeto</i>	3
2.1.2. <i>Engenharia Simultânea</i>	6
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS ÚNICOS.....	8
2.3. CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS ÚNICOS	10
3. PRINCÍPIOS DA TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJETO	11
3.1. OS DOMÍNIOS DO PROJETO	11
3.2. DECOMPOSIÇÃO HIERÁRQUICA	13
3.3. OS DOIS AXIOMAS DA TAP	14
3.3.1. <i>Primeiro Axioma - Axioma da independência</i>	14
3.3.2. <i>Segundo Axioma - Axioma da informação</i>	15
3.4. ENGENHARIA SIMULTÂNEA NA TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJETO	17
4. CONSTRANGIMENTOS	19
4.1. INTRODUÇÃO AO CONCEITO	19
4.2. RELAÇÃO ENTRE CONSTRANGIMENTOS.....	20
4.3. MÉTODOS DE PROJETO BASEADOS NOS CONSTRANGIMENTOS.....	21
5. ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA TAP NO PROJETO DE PRODUTOS ÚNICOS	23
5.1. ANÁLISE DO PROCESSO DE PROJETO DE PRODUTOS ÚNICOS.....	23
5.2. DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ÚNICOS BASEADO EM PROJETO AXIOMÁTICO	25
5.3. PRINCÍPIOS DA AXIOMÁTICA APLICADOS À FASE DE CONCEPTUAL	26
5.4. CONCLUSÃO DA ANÁLISE	28
6. METODOLOGIA PARA A SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO	31

6.1.	INTRODUÇÃO.....	31
6.2.	FLUXOGRAMA GERAL DA METODOLOGIA.....	32
6.3.	1ª ETAPA: GERAR SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA RFi	33
6.4.	2ª ETAPA: SELECIONAR PPs QUE NÃO AFETEM OS RESTANTES RFs	34
6.5.	3ª ETAPA: SELECIONAR PPs QUE CONTEMPLAM COMPONENTES NORMALIZADOS OU SOLUÇÕES ANTERIORMENTE BEM SUCEDIDAS	35
6.6.	4ª ETAPA: SELECIONAR SOLUÇÕES COM O MENOR GRAU DE CONFLITO COM OS CONSTRANGIMENTOS	36
6.6.1.	<i>Grau de conflito dos PPs com os constrangimentos.....</i>	36
6.6.2.	<i>PPs de níveis hierárquicos superiores avaliados como constrangimentos.....</i>	37
6.6.3.	<i>Atribuição de fator de relevância aos constrangimentos em soluções com o mesmo grau de conflito.....</i>	38
6.6.4.	<i>Fluxograma de seleção dos PPs com o menor grau de conflito com os constrangimentos</i>	39
6.7.	5ª ETAPA: VALIDAR CONSTRANGIMENTOS ENTRE O CONJUNTO DE PPs SELECIONADOS	40
6.7.1.	<i>Matriz de constrangimentos dos PPs seleccionados.....</i>	40
6.7.2.	<i>Fluxograma de validação dos constrangimentos entre o conjunto de PPs</i>	41
6.8.	6ª ETAPA: VALIDAÇÃO PELO 1º AXIOMA DA TAP	44
7.	CASO DE ESTUDO	48
7.1.	INTRODUÇÃO.....	48
7.2.	ENUNCIADO DO PROBLEMA	48
7.3.	CONSTRANGIMENTOS (Cs).....	48
7.4.	PRIMEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO	49
7.4.1.	<i>Etapa 1 a 4 - Seleção dos Parâmetros de Projeto</i>	49
7.4.2.	<i>Etapa 5 - Verificação dos constrangimentos entre PPs</i>	59
7.4.3.	<i>Etapa 6 - Validação pelo 1º Axioma da TAP</i>	64
7.5.	SEGUNDO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	66
7.5.1.	<i>Etapa 1 a 4 - Seleção dos Parâmetros de Projeto</i>	66
7.5.2.	<i>Etapa 5 - Verificação dos constrangimentos entre PPs</i>	86
7.5.3.	<i>Etapa 6 - Validação pelo 1º Axioma da TAP</i>	89
7.6.	TERCEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	92
7.6.1.	<i>Etapa 1 a 4 - Seleção dos Parâmetros de Projeto</i>	92
7.6.2.	<i>Etapa 5 - Verificação dos constrangimentos entre PPs</i>	109
7.6.3.	<i>Etapa 6 - Validação pelo 1º Axioma da TAP</i>	113
8.	CONCLUSÃO.....	117
	BIBLIOGRAFIA.....	119
	ANEXOS.....	121
	COROLÁRIOS E TEOREMAS DA TAP	121

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - FASES DO PROCESSO DE PROJETO SEGUNDO UM MODELO PRESCRITIVO, ADAPTADO DE [1].....	5
FIGURA 2.2-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO OU INFORMAÇÃO DURANTE O PROGRESSO DO PROCESSO DE PROJETO RELACIONADO COM A DIMINUIÇÃO DA LIBERDADE DE PROJETO [5].....	6
FIGURA 2.3- COMPARAÇÃO ENTRE ENGENHARIA “TRADICIONAL” E ENGENHARIA SIMULTÂNEA, ADAPTADO DE [6].....	7
FIGURA 2.4- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS CUSTOS E DO TEMPO DE SEGUNDO UMA ABORDAGEM DE ENGENHARIA SEQUENCIAL E SIMULTÂNEA [6].....	8
FIGURA 2.5- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS ÚNICOS [4].	10
FIGURA 3.1 – DOMÍNIOS DE PROJETO DA TAP, ADAPTADO DE [9].....	11
FIGURA 3.2- DECOMPOSIÇÃO ZIGUE-ZAGUE ENTRE OS DOMÍNIOS DE PROJETO [11].....	13
FIGURA 3.4-EXEMPLO DOS DIFERENTES TIPOS DE PROJETO. DE CIMA PARA BAIXO: PROJETO DESACOPLADO, DESACOPLÁVEL E ACOPLADO [14].	14
FIGURA 3.6- CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE SUCESSO NUM PROJETO COM UM <i>RF</i> E UM <i>PP</i> [4].....	16
FIGURA 3.7 – MODOS DE ENCADEAR AS TAREFAS DE UM PROJETO [4].	17
FIGURA 3.8- DECOMPOSIÇÃO EM ZIGUE-ZAGUE SEGUNDO ENGENHARIA SIMULTÂNEA [13]	18
FIGURA 4.1 – EXEMPLO DE UMA REDE DE CONSTRANGIMENTOS, ADAPTADO DE [17].....	20
FIGURA 4.2- EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DE UM GRUPO DE CONSTRANGIMENTOS [16].	21
FIGURA 5.1-REPRESENTAÇÃO DAS FASES DE PROJETO EM FUNÇÃO DA ATIVIDADE COMERCIAL.....	24
FIGURA 5.2 – ATIVIDADES DE PROJETO DE PRODUTOS ÚNICOS NO AMBIENTE DA TAP EM RELAÇÃO AO MOMENTO COMERCIAL DO PRODUTO.....	25
FIGURA 5.3 – DECOMPOSIÇÃO HIERÁRQUICA DE UM PRODUTO E IMPACTO DAS ALTERAÇÕES A PARÂMETROS DE PROJETO, ADAPTADO [14].....	27
FIGURA 5.4 – PRINCÍPIOS DA TAP APLICADOS AO PROJETO DE PRODUTOS ÚNICOS.....	29
FIGURA 6.1- FLUXOGRAMA GERAL DA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE <i>PPs</i>	32
FIGURA 6.2 – FLUXOGRAMA 1: GERAR SOLUÇÕES ALTERNATIVAS	33
FIGURA 6.3 – FLUXOGRAMA 2: SELECIONAR <i>PPs</i> QUE NÃO AFETAM RESTANTES <i>RFs</i>	34
FIGURA 6.4 – FLUXOGRAMA 3: SELEÇÃO DE <i>PPs</i> QUE CONTEMPLAM COMPONENTES NORMALIZADOS OU SOLUÇÕES ANTERIORMENTE BEM SUCEDIDAS.....	35
FIGURA 6.5 – FLUXOGRAMA 4: SELECIONAR AS SOLUÇÕES COM MENOR GRAU DE CONFLITO COM OS CONSTRANGIMENTOS ..	40
FIGURA 6.6 – FLUXOGRAMA 5: VALIDAÇÃO DOS CONSTRANGIMENTOS ENTRE OS <i>PPs</i> SELECIONADOS.....	42
FIGURA 6.7 – FLUXOGRAMA 5.1: VERIFICAÇÃO DOS <i>PPs</i> COM CONSTRANGIMENTOS DIFERENTES DE ZERO ENTRE SI	43
FIGURA 6.8 – FLUXOGRAMA 6: VALIDAÇÃO PELO 1º AXIOMA DA TAP	45
FIGURA 6.9 - FLUXOGRAMA 6.1: REVISÃO DOS <i>PPs</i> QUE PODEM TRANSFORMAR A MATRIZ DE PROJETO EM TRIANGULAR ..	46
FIGURA 7.1 – ESBOÇO ESQUEMÁTICO DO ENUNCIADO DO PROBLEMA	48
FIGURA 7.2- FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1</i>	50
FIGURA 7.3 – SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA O <i>RF1.2</i>	51
FIGURA 7.4 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2</i>	51
FIGURA 7.5 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2</i>	52
FIGURA 7.6- FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2</i>	53
FIGURA 7.7 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2</i>	55
FIGURA 7.8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PÓRTICO PARA MOVIMENTAÇÃO DE CARGA SUSPensa <i>PP1.3</i>	56
FIGURA 7.9 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3</i>	56

FIGURA 7.10-ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.4</i>	57
FIGURA 7.11 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.4</i>	57
FIGURA 7.12 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.4</i>	58
FIGURA 7.13 - FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.4</i>	59
FIGURA 7.14 – PRIMEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS.....	60
FIGURA 7.15 – PRIMEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO.....	60
FIGURA 7.16 – FLUXOGRAMA 5 PARA O PRIMEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	61
FIGURA 7.17 – FLUXOGRAMA 5.1 PARA <i>PP1.2</i> <i>PP1.3</i>	62
FIGURA 7.18 - FLUXOGRAMA 5.1 PARA <i>PP1.4</i>	63
FIGURA 7.19 – FLUXOGRAMA 6 PARA O PRIMEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	64
FIGURA 7.20 – FLUXOGRAMA 6.1 PARA <i>PP1.2</i> E <i>PP1.3</i>	65
FIGURA 7.21 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.1</i>	66
FIGURA 7.22 - ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.1.2</i>	67
FIGURA 7.23 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.2</i>	67
FIGURA 7.24 – FLUXOGRAMA 2, PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.2</i>	68
FIGURA 7.25 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.2</i>	69
FIGURA 7.26 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.2</i>	71
FIGURA 7.27 ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.2.1</i>	72
FIGURA 7.28 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1</i>	72
FIGURA 7.29 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1</i>	73
FIGURA 7.30 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1</i>	74
FIGURA 7.31 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1</i>	77
FIGURA 7.32 - ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.3.1</i>	78
FIGURA 7.33 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.1</i>	78
FIGURA 7.34 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.1</i>	79
FIGURA 7.35 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.1</i>	80
FIGURA 7.36 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.1</i>	82
FIGURA 7.37 - ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.3.2</i>	82
FIGURA 7.38 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2</i>	83
FIGURA 7.39 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2</i>	83
FIGURA 7.40 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.1</i>	84
FIGURA 7.41 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2</i>	85
FIGURA 7.42 - SEGUNDO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS	86
FIGURA 7.43 - SEGUNDO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO	86
FIGURA 7.44 – FLUXOGRAMA 5 PARA O SEGUNDO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO	87
FIGURA 7.45 – FLUXOGRAMA 5.1 PARA <i>PP1.2.1</i> E <i>PP1.3.2</i>	88
FIGURA 7.46 – FLUXOGRAMA 6 PARA <i>PP1.1.1</i> E <i>PP1.1.2</i>	89
FIGURA 7.47 – FLUXOGRAMA 6 PARA <i>PP1.3.1</i> E <i>PP1.3.2</i>	90
FIGURA 7.48- FLUXOGRAMA 6.1 PARA <i>PP1.3.1</i> E <i>PP1.3.2</i>	91
FIGURA 7.49 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.1.1</i>	92
FIGURA 7.50 - ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.1.1.2</i>	93
FIGURA 7.51 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.1.2</i>	93
FIGURA 7.52 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.1.2</i>	94
FIGURA 7.53 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.1.1.2</i>	95

FIGURA 7.54 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2</i>	96
FIGURA 7.55 - ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.2.1.1</i>	97
FIGURA 7.56 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.1</i>	97
FIGURA 7.57 – FLUXOGRAMA 2, PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.1</i>	98
FIGURA 7.58 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.1</i>	99
FIGURA 7.59 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.1</i>	101
FIGURA 7.60 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.2</i>	102
FIGURA 7.61 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.2</i>	102
FIGURA 7.62 - FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.2.1.2</i>	103
FIGURA 7.63 - ILUSTRAÇÃO DA SOLUÇÃO <i>PP1.3.1.1</i>	104
FIGURA 7.64 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.1.1</i>	104
FIGURA 7.65 - ILUSTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.3.1.2</i>	105
FIGURA 7.66 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2.1</i>	106
FIGURA 7.67 – FLUXOGRAMA 1 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2.3</i>	106
FIGURA 7.68 – FLUXOGRAMA 2 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2.3</i>	107
FIGURA 7.69 – FLUXOGRAMA 3 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2.3</i>	107
FIGURA 7.70 – FLUXOGRAMA 4 PARA A SELEÇÃO DE <i>PP1.3.2.3</i>	109
FIGURA 7.71 – TERCEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS.....	110
FIGURA 7.72 - TERCEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO	111
FIGURA 7.73 – FLUXOGRAMA 5 PARA O TERCEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	113
FIGURA 7.74 – FLUXOGRAMA 5 PARA O TERCEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	115
FIGURA 7.75 – EQUIPAMENTO INSTALADO NO LOCAL DE FUNCIONAMENTO	116

Índice de Tabelas

TABELA 6.1 – GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1</i> PERANTE O CONSTRANGIMENTO <i>C1</i>	36
TABELA 6.2 - GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS <i>RF1</i> PERANTE O CONSTRANGIMENTO <i>C2</i>	37
TABELA 6.3 - GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS <i>RF1</i> PERANTE OS CONSTRANGIMENTOS.....	37
TABELA 6.4 - GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF2</i> PERANTE OS CONSTRANGIMENTOS	38
TABELA 6.5 - GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF2</i> PERANTE OS CONSTRANGIMENTOS COM FATOR DE RELEVÂNCIA ATRIBUÍDO	39
TABELA 6.6 – MATRIZ DE CONSTRANGIMENTOS ENTRE <i>PPs</i>	41
TABELA 7.1 – ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.2</i> FACE AOS CONSTRANGIMENTOS EXISTENTES.....	54
TABELA 7.2 - MATRIZ DE CONSTRANGIMENTOS ENTRE <i>PPs</i> DO PRIMEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO.....	60
TABELA 7.3 - ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.1.2</i> FACE AOS CONSTRANGIMENTOS EXISTENTES.....	70
TABELA 7.4 - ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.2.1</i> FACE AOS CONSTRANGIMENTOS EXISTENTES.....	75
TABELA 7.5 – GRAU DE CONFLITOS DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.2.1</i> COM OS CONSTRANGIMENTOS COM MAIOR FATOR DE RELEVÂNCIA	76
TABELA 7.6 – ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.3.1</i> FACE AOS CONSTRANGIMENTOS EXISTENTES.....	81
TABELA 7.7 – ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.3.2</i> FACE AOS CONSTRANGIMENTOS EXISTENTES.....	85
TABELA 7.8 - MATRIZ DE CONSTRANGIMENTOS ENTRE <i>PPs</i> DO SEGUNDO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO	86
TABELA 7.9 - ANÁLISE DO GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.1.1.2</i> COM OS CONSTRANGIMENTOS	95
TABELA 7.10 - ANÁLISE DO GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.2.1.1</i> COM OS CONSTRANGIMENTOS	100
TABELA 7.11 - ANÁLISE DO GRAU DE CONFLITO DAS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA <i>RF1.3.2.3</i> COM OS CONSTRANGIMENTOS	108
TABELA 7.12 - MATRIZ DE CONSTRANGIMENTOS ENTRE <i>PPs</i> DO TERCEIRO NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO	112

Nomenclatura

<i>TAP</i>	Teoria Axiomática de Projeto
<i>NC</i>	Necessidade do cliente
<i>RF</i>	Requisito funcional
<i>PP</i>	Parâmetro de projeto
<i>VP</i>	Variável de processo
<i>C</i>	Constrangimento
<i>[A]</i>	Matriz de projeto
<i>I</i>	Informação
<i>p</i>	Probabilidade de sucesso
<i>fr</i>	Fator de relevância

1. Introdução

1.1. Motivação

A motivação para o estudo deste tema surge da experiência profissional do autor do presente trabalho e das dificuldades com que este se deparou no desempenhar de tarefas de projeto de produtos únicos.

O projeto de produtos únicos, é uma atividade de projeto que possui algumas características distintas e para a qual ainda não foi dedicado muito tempo de estudo e investigação, existindo poucas ferramentas orientadas para o projeto deste tipo de produtos. A falta de ferramentas de projeto que sejam adequadas para esta atividade, faz com que o seu sucesso fique muito dependente da capacidade e experiência do projetista.

1.2. Definição do Problema

A decisão é uma tarefa constante da atividade de projeto em engenharia, existindo algumas decisões de maior responsabilidade e importância durante a atividade. Existem decisões que podem ser tomadas através de dados técnicos concretos, enquanto para outras não é possível obter esses dados, devido às condições em que têm de ser tomadas. O projeto de produtos únicos implica conceber soluções para um propósito muito específico, em que a replicação destas soluções seja muito improvável. Uma das principais características desta atividade é, portanto, a incerteza associada à construção de novas soluções, cujo seu desempenho real é apenas conhecido quando estas são colocadas perante as condições reais de funcionamento. Nesta atividade de projeto o protótipo corresponde ao produto final, portanto, o insucesso das soluções selecionadas pode comprometer a qualidade do produto, os compromissos financeiros internos estabelecidos e os compromissos estabelecidos com o cliente para a entrega do produto.

O valor comercial destes produtos é estabelecido a partir do conceito definido para os mesmos, sendo, por isso, importante definir as soluções de uma forma eficiente, ou seja, conceitos com elevada probabilidade de cumprirem os requisitos estabelecidos com sucesso, que não necessitem de serem revistos numa fase mais avançada do desenvolvimento de pormenor da solução.

A necessidade de alterações deve-se, muitas das vezes, a conflitos com os constrangimentos existentes e a conflitos com os constrangimentos que as próprias soluções parciais do projeto oferecem

umas às outras, conflitos estes que só são tidos em conta e avaliados numa fase de desenvolvimento e detalhe do projeto.

1.3. Objetivos

No presente trabalho pretende-se estabelecer uma metodologia de seleção de parâmetros de projeto que suporte o processo de tomada de decisão na atividade de projeto.

Esta metodologia será baseada numa teoria de projeto existente, avaliando a sua aplicação no projeto de produtos únicos e de que forma pode ser melhorada ou completada, com o objetivo de estruturar um método de decisão que permita guiar o projetista neste processo.

Pretende-se que com a presença desta metodologia, a definição de conceitos de soluções de projeto seja feita de uma forma mais eficiente, diminuindo a necessidade de alterações numa fase posterior de desenvolvimento e pormenor das mesmas.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por oito capítulos.

No primeiro, e presente, capítulo é introduzido o tema, identificando a motivação para o mesmo, identificando o problema que se pretende abordar e o qual o objetivo que se pretende alcançar.

O segundo capítulo é referente à atividade de projeto de produtos únicos, fazendo-se uma introdução à atividade de projeto e identificando depois as características distintas do projeto deste tipo de produtos.

No terceiro capítulo é apresentada a Teoria Axiomática de Projeto, identificando os seus principais axiomas, teoremas e corolários

O quarto capítulo dedica-se aos constrangimentos, apresentando os tipos de constrangimentos, como podem ser relacionados e os métodos de projeto que existem baseados nos mesmos.

No quinto capítulo é verificada a aplicação da Teoria Axiomática de Projeto ao Projeto de Produtos únicos, identificando como pode ser aplicada e como pode ser completada para se melhor adequar ao projeto deste tipo de produtos.

No sexto capítulo é proposta a Metodologia para a Seleção de Parâmetros de Projeto com base no Grau de Conflito com os Constrangimentos.

No sétimo capítulo é aplicada a Metodologia proposta a um caso de estudo.

No oitavo, e último capítulo, são retiradas as conclusões da aplicação desta metodologia e apresentadas propostas trabalhos futuros.

2. Projeto de Produtos Únicos

2.1. Projeto em Engenharia

O pensamento que sustenta o projeto está presente no cotidiano de qualquer ser humano [1], ainda que inconscientemente. No que diz respeito à engenharia, o projeto está ainda mais presente [2], nos mais diversos ramos e indústrias. Os engenheiros são constantemente confrontados com problemas e com necessidades das mais variadas naturezas, para as quais, através do seu conhecimento técnico, assim como outras ferramentas que possam ter disponíveis, têm que encontrar soluções de acordo com o ambiente que os rodeia [1] [2] [3].

A atividade de projeto requer quatro aspetos característicos da área da engenharia e da ciência. São estes, a definição de um problema claro através de factos e elementos dispersos, o processo criativo de elaborar uma proposta para a incorporação das soluções definidas, o processo analítico de determinar se a solução proposta é correta ou racional e uma última verificação da satisfação das necessidades originalmente definidas, por parte do produto projetado [2].

Nas empresas que possuem a atividade de projeto na sua estrutura funcional, esta acaba por apresentar um papel fundamental no sucesso da empresa [1], uma vez que tem grande influência na qualidade dos produtos colocados no mercado.

É deste modo importante, que a atividade de projeto dentro de uma organização possua as ferramentas necessárias para que, durante o seu processo, sejam tomadas as melhores decisões possíveis, uma vez que a qualidade destas decisões terá um impacto direto no produto.

2.1.1. Processo de projeto

A atividade de projeto tem sido alvo de investigações por parte da comunidade científica, de onde foram resultando ferramentas, metodologias, teorias tal como outras bases para sustentar esta atividade.

Tendo o projeto um papel fundamental no ciclo de vida do produto, apresentando influência em todas as fases do mesmo, é importante que os projetistas tenham, nas suas organizações, um processo de projeto estruturado, baseado em ferramentas científicas, que permitam a planeamento e a monitorização das ações e decisões, e que assegurem o sucesso do mesmo [1] [2].

Certamente, algumas organizações, não seguem processos rigorosos de projeto. Se for analisado o processo de desenvolvimento de dois produtos numa empresa que não tenha um processo de projeto devidamente estruturado, possivelmente serão encontradas muitas diferenças, mas também muitas semelhanças, que surgem quer do processo cognitivo natural da atividade de projetar, quer pela transmissão do método de trabalho entre os projetistas das empresas. A existência ou a implementação de um procedimento para executar o projeto, pretende criar um caminho consciente e objetivo para o mesmo

[1], eliminando a coincidência dessas semelhanças e a ocorrência de diferentes métodos de trabalho, tentando optar por um processo que se verifique eficaz.

Os processos de projeto de uma organização, devem estar estruturados e implementados de forma a que as decisões tomadas para as soluções de determinados problemas, sejam as que tragam mais benefícios quer a nível técnico quer a nível económico [1].

O processo de projeto pode ser definido por modelos, prescritivos ou descritivos, que consistem em representações das filosofias ou estratégias propostas de como o processo deve decorrer [4] . Os modelos prescritivos sugerem, através de uma explicação lógica, a melhor maneira de como o processo de projeto deve decorrer cobrindo os diferentes passos procedimentais [4] [5]. Os modelos descritivos, abordam as ações dos projetistas e as suas atividades durante o processo de projeto e são, normalmente, definidos através de casos empíricos de situações de projeto em que se captura uma forma genérica e natural de resolver tarefas [4] [5].

De uma perspetiva prescritiva, o processo de projeto pode ser dividido em quatro fases, esquematizadas na Figura 2.1. A primeira fase, o planeamento e clarificação da tarefa, que consiste na especificação da informação; a fase de projeto conceptual, onde se especificam os princípios de solução; a fase de incorporação, onde se estabelece a estrutura do produto através da incorporação das soluções definidas; e a fase de pormenor, ou detalhe, onde se estabelecem as especificações para a produção da solução [1].. Dependendo da organização ou da complexidade dos projetos, estas fases podem, por vezes, sobrepor-se.

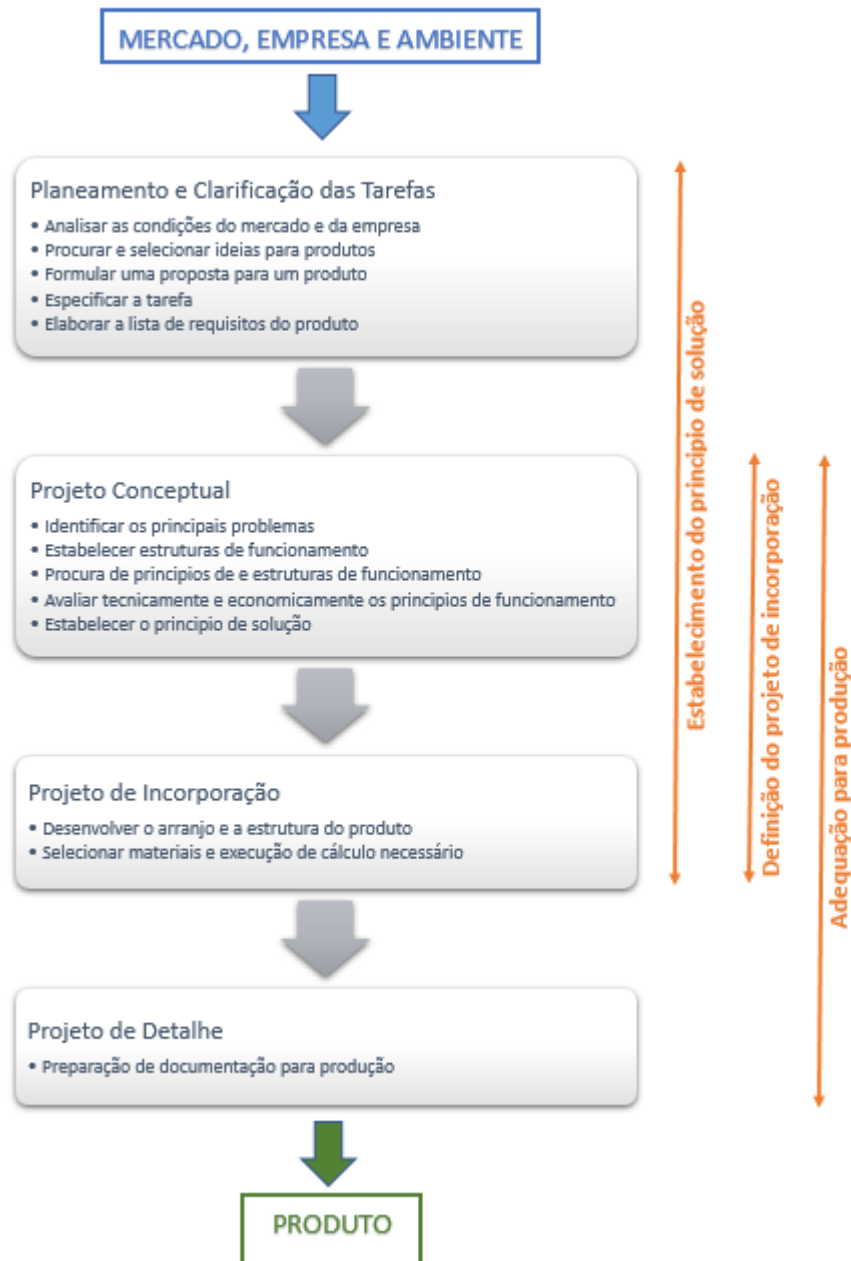


Figura 2.1 - Fases do processo de projeto segundo um modelo prescritivo, adaptado de [1].

Durante o progresso do projeto pelas fases referidas, o conhecimento do problema e da solução vai aumentando. Nas primeiras fases como o conhecimento é reduzido, a liberdade para definir soluções é elevada, enquanto nas fases finais o conhecimento do problema e das soluções é mais elevado, mas a liberdade para a definição de soluções é reduzida. Na Figura 2.2, está representada esquematicamente a evolução do conhecimento sobre o problema e a liberdade do projetista para definir soluções.

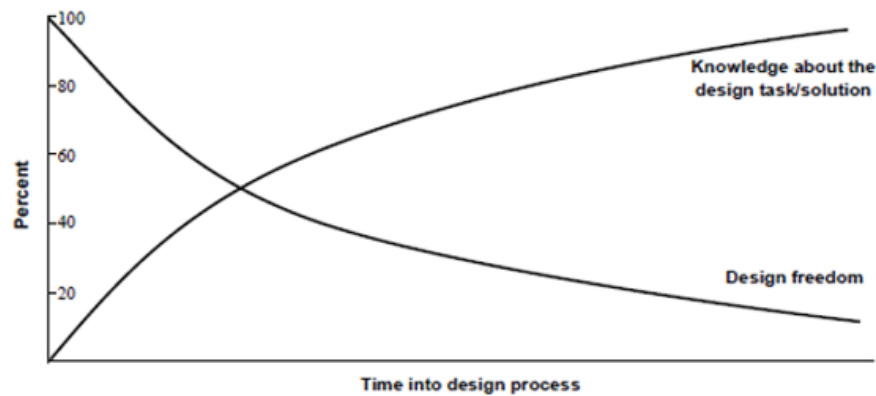


Figura 2.2-Representação esquemática da evolução do conhecimento ou informação durante o progresso do processo de projeto relacionado com a diminuição da liberdade de projeto [5].

As decisões tomadas nas fases iniciais do projeto têm um maior impacto do que as decisões tomadas nas fases finais do projeto [5], uma vez que estas condicionam todas as fases posteriores do projeto.

2.1.2. Engenharia Simultânea

Numa empresa que tenha presente a atividade de projeto, o projetista acaba por ter uma grande responsabilidade uma vez que as suas decisões acabam por ter um grande impacto no ciclo de vida do produto [4], é portanto, cada vez mais adotada uma abordagem de Engenharia Simultânea no desenvolvimento dos produtos, exigindo dos projetistas conhecimentos em vários domínios.

A Engenharia Simultânea, ou *Coucurrent Engineering* na terminologia anglo-saxónica, trata-se de uma abordagem ao processo de desenvolvimento e produção de um produto, em que as atividades de engenharia envolvidas nestes processos ocorrem, sempre que possível, paralelamente umas às outras em vez de ocorrerem sequencialmente [6]. A diferença entre a abordagem sequencial e a abordagem de Engenharia Simultânea, está representada na Figura 2.3.

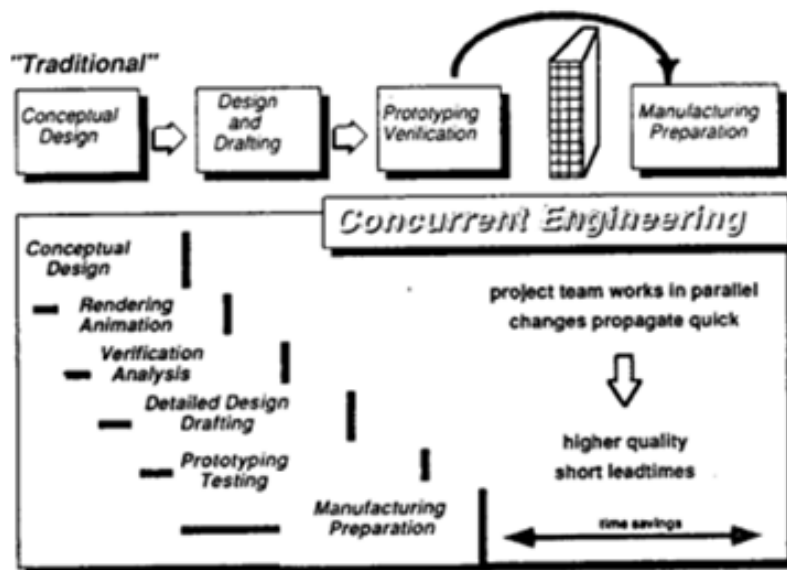


Figura 2.3- Comparação entre Engenharia “Tradicional” e Engenharia Simultânea, adaptado de [6].

O principal objetivo da Engenharia Simultânea é diminuir o tempo necessário para colocar um produto no mercado, quer se trate de um produto novo ou de um produto existente comparativamente ao que seria necessário perante uma abordagem de Engenharia “Tradicional” ou Sequencial [6]. Pretende-se então, com uma abordagem de Engenharia Simultânea reduzir o tempo necessário para o processo de projeto, no caso de se tratar de um produto novo, assim como o processo produtivo, que está presente tanto num produto novo como num produto existente.

Esta abordagem tem também como principal objetivo aumentar a qualidade do produto dentro dos menores custos possíveis [6]. Ao sobrepor as atividades de engenharias envolvidas, quer no processo de projeto quer no processo de produção, diminui-se o risco da necessidade de alterações numa fase mais avançada do produto, que podem ser provocadas, por exemplo, por não serem tidos em conta aspetos produtivos (de fabrico e montagem) numa fase de desenvolvimento do produto. Estas alterações em fases avançadas podem levar a custos elevados ou a atrasos na colocação do produto no mercado. Assim, pretende-se com esta abordagem, que as alterações sejam minimizadas e que ocorram o mais cedo possível no processo de projeto [6]. Portanto, além do objetivo de reduzir o tempo de colocação de um produto no mercado, a Engenharia Simultânea permite também uma redução de custos no desenvolvimento e produção dos produtos, como se representa na Figura 2.4.

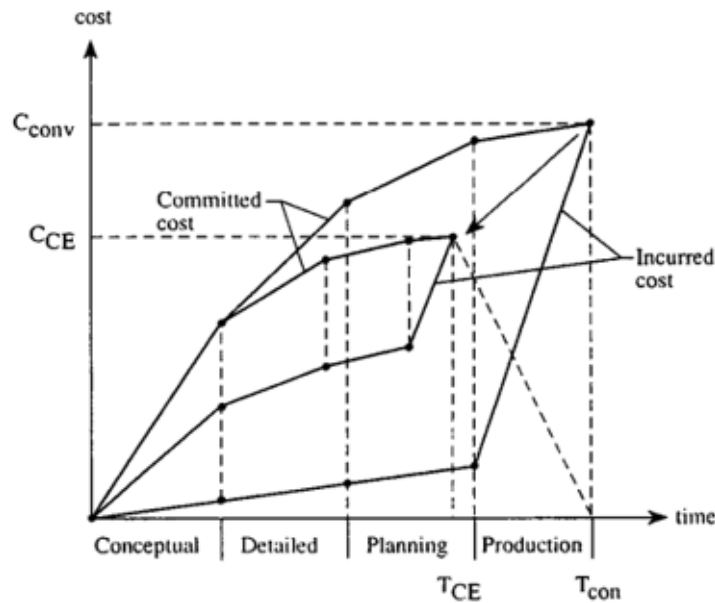


Figura 2.4- Representação Gráfica dos custos e do tempo de segundo uma abordagem de Engenharia Sequencial e Simultânea [6].

Esta metodologia requer maior investimento em capital e em tempo na fase conceitual, mas que se pretende que seja compensado nas fases posteriores do desenvolvimento do produto [4].

2.2. Características dos produtos únicos

Os produtos únicos são normalmente obtidos através de requisitos particulares do mercado, o que lhes atribui características e funcionalidades muito próprias e normalmente destinam-se a servir apenas um propósito. Estes produtos têm requisitos muito específicos e são desenvolvidos com base no conhecimento da empresa de projeto [1].

Os produtos únicos acabam por ter a eles associados alguma inovação, do ponto de vista interno da empresa, quer seja por apresentarem requisitos completamente novos quer seja por apresentarem variações comparativamente a produtos anteriores, que exigem alterações nos produtos [1]. A capacidade de uma empresa adaptar os seus produtos a estas variações poder ser positiva do ponto de vista de posicionamento no mercado, porque permitem fornecer uma ampla quantidade de soluções aos clientes, por outro lado, também estão associados custos mais elevados, principalmente ligados ao projeto e à produção.

A existência de um protótipo para este tipo de produtos, não é economicamente viável, acabando por o produto final ser o próprio protótipo [1] [4], exigindo que o projeto seja feito de uma maneira defensiva, de modo a minimizar os riscos e a garantir a funcionalidade. Esta exigência leva a que seja mais seguro uma abordagem ao projeto sustentada no sobredimensionamento [4].

A nível de custos, o impacto que o projeto e o desenvolvimento têm no valor final dos produtos únicos é reduzido, não existindo grande recursos financeiros para suportar esta fase do ciclo do produto, sendo os custos de projeto muito inferiores aos de produção [7]. A competitividade no mercado para este tipo de produtos, também condiciona o processo de desenvolvimento dos mesmos, uma vez que exige valores comerciais e prazos de entrega reduzidos, inviabilizando, por exemplo, otimizações sucessivas no projeto do produto.

A maioria das empresas que se dedicam a fornecer este tipo de produtos são, na maioria dos casos, pequenas e médias empresas. Os recursos de projeto, assim como dos outros setores destas empresas, são reduzidos levando a que o processo de projeto de um produto único seja executado, muitas vezes, apenas por um projetista, o que condiciona o processo de projeto e leva a que este seja adaptado de outros [4]. Também os recursos produtivos são normalmente reduzidos e limitados, condicionando as configurações geométricas de peças que se permite obter, fator que influencia também algumas decisões de projeto.

Muitas destas empresas apresentam normalmente uma estrutura organizacional, característica esta que pode influenciar a própria organização e estruturação de um processo de projeto. Ainda assim em estruturas mais reduzidas torna-se mais fácil a implementação de novos processos ou modificações a processos existentes.

A proposta comercial para estes produtos é resultante de uma estimativa de custos realizada a partir do conceito definido para o produto [4]. Nesta fase a quantidade de informação é ainda reduzida. A obtenção de mais informação, para que se possa ter uma estimativa de custo mais precisa, resulta do desenvolvimento do projeto que requer recursos e implica custos financeiros que terão que ser suportados pela própria empresa.

O projeto de produtos únicos apresenta, portanto, características impostas pelo mercado e pela dimensão das empresas onde são executados. No que diz respeito ao mercado a que se destinam estes produtos, este exige requisitos específicos, prazos de entrega muito curtos e preços competitivos com margens reduzidas para as empresas, exigindo que o processo de projeto seja eficiente, não existindo tempo e viabilidade económica para ensaios e otimizações das várias fases do ciclo de vida do produto. Esta limitação leva a que muitas vezes o produto seja sobredimensionado para lidar com as incertezas inerentes do desenvolvimento de novas soluções. O facto de estes produtos serem normalmente desenvolvidos por empresas de pequena dimensão com poucos recursos, faz com que, muitas das vezes, o projeto esteja ao cargo apenas de um projetista, exigindo uma grande responsabilidade da parte do mesmo [4]. Também os recursos e tecnologias de produção nestas empresas são limitados, influenciando muito as decisões de projeto que quando possível são tomadas de modo a ir ao encontro com as capacidades da empresa.

2.3. Ciclo de vida dos produtos únicos

Como anteriormente referido, na comercialização dos produtos únicos, existe uma fase de projeto conceptual antes da venda do produto. Nesta fase pretende-se obter um conceito para o produto que permita estimar custos para as restantes fases do ciclo de vida do produto (restantes fases do projeto, produção, instalação e comissionamento). Sendo este conceito desenvolvido antes da venda, os custos inerentes à obtenção do mesmo são suportados pela empresa sem garantias que a venda seja realizada. Esta característica dos produtos únicos faz com que o seu ciclo de vida seja diferente do de outros produtos, representado na Figura 2.5.



Figura 2.5- Representação esquemática do ciclo de vida dos produtos únicos [4].

O valor comercial destes produtos é estabelecido sem que o projeto do mesmo esteja completamente desenvolvido, ao contrário de outros produtos em que o seu valor comercial é estabelecido após o desenvolvimento, na íntegra, do mesmo.

Para os produtos únicos é realizada uma estimativa do custo de desenvolvimento, pormenor e produção do mesmo e é normalmente uma estimativa obtida através de informação pouco rigorosa e detalhada, sendo esta uma atividade de risco e muito dependente da experiência do projetista e/ou orçamentista que a executa.

3. Princípios da Teoria Axiomática de Projeto

A Teoria Axiomática de Projeto (TAP), foi desenvolvida por Nam Pyo Suh há cerca de 30 anos e descreve matematicamente todo o processo de projeto [2].

A abordagem axiomática assume que existem princípios generalizados que governam o comportamento subjacente [8]. Os axiomas são princípios gerais ou verdades evidentes que não podem ser provadas como verdadeiras, mas que para os quais não existem exemplos contrários ou exceções [8]. A TAP apresenta-se assim como um método sistemático para conduzir, documentar e melhorar a atividade de projeto assim como definir as melhores soluções de projeto [4].

As principais características da TAP são a existência de um ambiente de projeto com quatro domínios, um processo de decomposição em zigue-zague entre os domínios que estabelece uma hierarquia no projeto, existindo uma matriz que caracteriza a transição entre os domínios, e por fim os dois axiomas de projeto, o Axioma da Independência e o Axioma da Informação [8] [9] [10].

3.1. Os Domínios do Projeto

De acordo com a TAP, qualquer objeto de projeto, podendo ser um artefacto, um processo ou qualquer outro sistema técnico tangível ou intangível, pode ser retratado em quadro domínios [11], estes domínios estão representados na Figura 3.1.

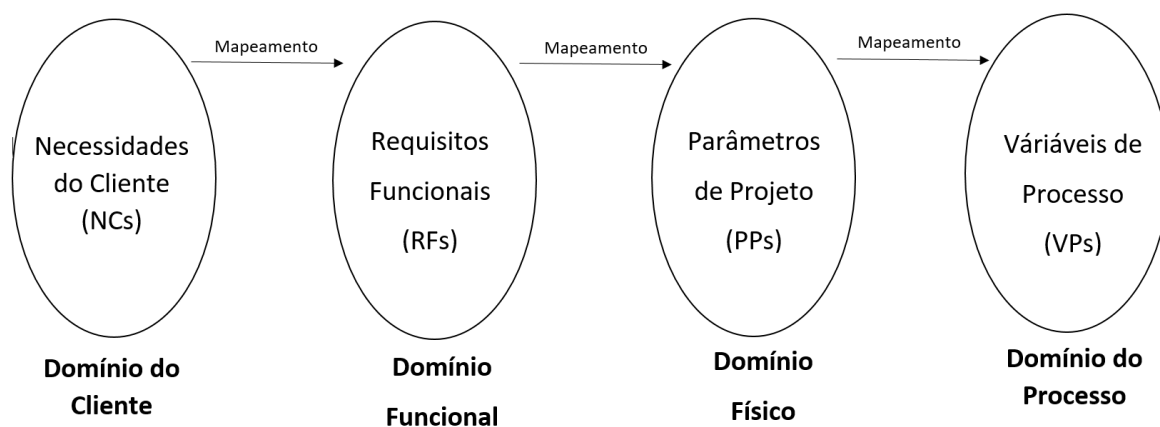


Figura 3.1 – Domínios de projeto da TAP, adaptado de [9].

O domínio à esquerda relativamente ao domínio à direita representa “O que se quer alcançar”, enquanto que o domínio à direita representa “Como se quer alcançar” [9].

Do domínio do cliente, fazem parte as necessidades do cliente (NCs), que se esperam que sejam satisfeitas com o produto ou sistema.

No domínio funcional, temos os requisitos funcionais (RFs) que são estabelecidos para satisfazer as necessidades do cliente. Num bom projeto, os requisitos funcionais são o menor conjunto de requisitos independentes que descrevem completamente as necessidades funcionais da solução do projeto [4].

No domínio físico, existem os parâmetros de projeto (PPs), que são as soluções definidas para satisfazerem os requisitos funcionais estabelecidos.

Por fim, há o domínio do processo, onde existem as variáveis de processo (VPs), que estabelecem o processo de produção das soluções definidas.

O mapeamento das relações entre os domínios é feito durante o processo de projeto e este mapeamento é representado sobre a forma de matriz [4]. A relação entre o Domínio Funcional e o Domínio Físico, é estabelecida pela Equação 3.1.

$$\{RFs\} = [A]\{PPs\}, \quad (3.1)$$

onde $\{RFs\}$ é o vetor dos requisitos funcionais, $\{PPs\}$ é o vetor dos parâmetros de projeto e $[A]$ consiste na matriz de projeto, que caracteriza o projeto do produto e cujos elementos da matriz podem ser descritos pela Equação 3.2.

$$A_{ij} = \frac{\partial RF_i}{\partial PP_j} \quad (3.2)$$

O elemento A_{ij} é diferente de zero, quando o parâmetro de projeto PP_j afeta o requisito funcional RF_i , [4].

O mapeamento entre o domínio físico e o domínio do processo é descrito pela Equação 3.3.

$$\{PPs\} = [B]\{VPs\}, \quad (3.3)$$

onde $\{PPs\}$ é o vetor dos parâmetros de projeto, $\{VPs\}$ é o vetor das variáveis do processo.

Para além destes quatro domínios definidos pela TAP, existem também os constrangimentos ao projeto. Estes influenciam a atividade de mapeamento entre domínios e são compostos pelos constrangimentos de entrada, que são impostos como fazendo parte das necessidades do cliente, e os constrangimentos do sistema, que são impostos pela proposta de solução de projeto que vai sendo desenvolvida [4] [11].

3.2. Decomposição hierárquica

A decomposição de um produto é uma tarefa importante para o sucesso do mesmo, devendo estar presente no processo de projeto. A atividade de decomposição facilita o processo de projeto [1] e fornece uma boa base para a organização do mesmo.

A TAP propõem uma decomposição hierárquica em zigue-zague entre domínios, representado na Figura 3.2, desde o nível mais elevado da hierarquia, o nível global do sistema, até ao nível mais inferior da hierarquia, isto é, ao nível mais elementar e de maior pormenor [4].

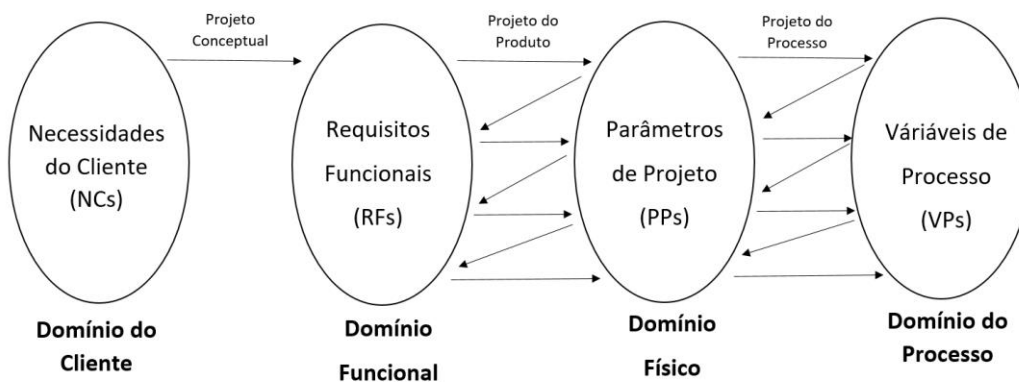


Figura 3.2- Decomposição zigue-zague entre os Domínios de Projeto [11]

Na decomposição entre o domínio funcional e o domínio físico, ao se estabelecer um determinado *PP* para determinado *RF*, o mesmo é decomposto em requisitos funcionais a um nível hierárquico inferior, para os quais são definidos novamente parâmetros de projeto, repetindo-se este exercício sucessivamente até atingir um nível de pormenor elementar. A hierarquia estabelecida entre os *RFs* e os *PPs* representa a estrutura do projeto [4] [12].

A escolha de Requisitos funcionais e de Parâmetros de projeto num determinado nível de abstração tem importantes consequências nos níveis mais baixo, sendo importante que o percurso de decomposição seja feito em zigue-zague [13].

Quando se atinge um nível de funcionalidades elementar, em que os *RFs* e que não necessitam de mais decomposição, estes são definidas como “folhas”. Os *RFs* dos níveis hierárquicos acima, são cumpridos através da combinação destas folhas [9].

A sequência da fase conceptual de projeto e da fase de incorporação e detalhe pode ser considerada como o avanço para os níveis mais baixos da hierarquia [12], à medida que se descem níveis na hierarquia do projeto, o detalhe aumenta consequentemente até que a tarefa de projeto do produto esteja concluída

3.3. Os dois axiomas da TAP

Como já referido, um axioma trata-se de uma verdade evidente para as quais não existem exceções ou exemplos contrários e que podem não ser derivados de leis ou de outros princípios da natureza [9]. Os Axiomas da TAP foram identificados através da análise de projetos bem sucedidos, verificando os elementos comuns presentes nestes projetos, assim como de ações realizadas durante a fase de projeto que melhoraram significativamente a solução de projeto [8] [9].

A abordagem axiomática estabelece dois axiomas que são fundamentais para guiar o processo de projeto de forma a garantir que são tomadas decisões corretas durante todas as fases do projeto. Durante o processo de mapeamento entre o domínio funcional e o domínio físico, deve-se assegurar que são tomadas as decisões corretas recorrendo em primeira lugar ao primeiro axioma da TAP, o axioma da independência, e quando este axioma não se revela suficiente para a tomada de decisão, deve se recorrer ao segundo axioma da TAP, o axioma da informação, para se optar pela melhor solução de projeto [9].

3.3.1. Primeiro Axioma - Axioma da independência

O primeiro axioma da TAP, é o axioma da independência. Este axioma é muitas vezes associado à independência física das soluções de um sistema, quando na realidade o requisito imposto por este axioma é que as funções do projeto sejam independentes [9].

O axioma da independência afirma que quando existem dois ou mais requisitos funcionais (*RFs*), a solução de projeto, ou seja os parâmetros de projeto (*PPs*) devem ser definidos de forma a que cada requisito funcional possa ser satisfeito sem que afete os restantes requisitos funcionais, ou seja, o conjunto de parâmetros de projeto devem satisfazer os requisitos de projeto de forma a que estes se cumpram independentemente [8] [9].

As possíveis configurações da matriz de projeto, representadas na Figura 3.3, definem como o axioma da independência é satisfeito.

$$\begin{array}{c}
 \begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \dots \\ FR_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X & O & \dots & O \\ O & X & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ O & O & \dots & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \dots \\ DP_n \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \dots \\ FR_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X & O & \dots & O \\ X & X & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X & O & \dots & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \dots \\ DP_n \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \dots \\ FR_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X & X & \dots & X \\ X & X & \dots & X \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X & X & \dots & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \dots \\ DP_n \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Figura 3.3-Exemplo dos diferentes tipos de projeto. De cima para baixo: projeto desacoplado, desacoplável e acoplado [14].

Para satisfazer o axioma da independência, a matriz de projeto $[A]$, deve ser diagonal ou triangular [9]. Quando a matriz de projeto é diagonal, significa que cada RF pode ser alcançado independentemente por meio de um PP e neste caso o projeto pode ser classificado como desacoplado [9]. Quando a matriz de projeto é triangular, a independência dos RFs pode ser garantida apenas se os PPs forem estabelecidos numa determinada sequência, e o projeto é classificado como desacoplável [9]. Quando a matriz de projeto não é nem diagonal nem triangular, significa que se está perante um projeto acoplado.

É denominado de projeto ideal aquele em que o número de PPs é igual ao número de RFs [9].

Quando se está perante um projeto em que o número de PPs é inferior ao número de RFs , ou estamos perante um projeto acoplado ou os RFs não podem ser satisfeitos [9].

Perante um projeto acoplado devido a um número superior de RFs em relação aos PPs , o mesmo poderá ser desacoplado pela adição de novos PPs . Por exemplo, adicionar componentes para levar a cargo determinadas funções [14], para que o número de RFs e PPs seja igual e passar a ter uma matriz de projeto triangular [9].

A Teoria Axiomática de Projeto propõe, que no caso de se estar perante um projeto para o qual existem várias soluções alternativas que satisfazem o axioma da independência, não podendo este ser um critério de decisão para a solução a adotar, deve ser utilizado como critério de decisão o segundo axioma, o axioma da informação.

3.3.2. Segundo Axioma - Axioma da informação

A Teoria Axiomática de Projeto define que mesmo podendo existir muitas soluções de projeto aceitáveis do ponto de vista funcional, dentro destas soluções existe uma superior de um ponto de vista de probabilidade de sucesso de atingir o seu requisito funcional [9].

O axioma da informação proporciona uma forma de avaliar a qualidade do projeto [4] e estabelece que ao minimizar o conteúdo da informação de um parâmetro de projeto se aumenta a probabilidade de sucesso de satisfazer essa função.

A quantidade de informação I , é definida através da probabilidade de uma determinada solução de projeto satisfazer o seu requisito funcional. Se a probabilidade de sucesso de satisfazer determinado requisito funcional for p , a informação I , definida em unidades de bits, pode ser traduzida na Equação 3.4 [9].

$$I = -\log_2 p \quad (3.4)$$

E com logaritmo natural pela Equação 3.5.

$$I = -\log p \quad (3.5)$$

Para uma solução de projeto desacoplada com n Requisitos Funcionais, I pode ser definida pela Equação 3.6 [14]:

$$I = \sum_{i=1}^n [\log 1/p_i] , \quad (3.6)$$

onde p_i , representa a probabilidade de PP_i satisfazer RF_i . O conteúdo total de informação é a soma das probabilidades dos n requisitos funcionais.

Portanto, a solução de projeto para o qual o valor de I é menor, segundo o axioma da informação, é a melhor solução [9].

A probabilidade de PP_i satisfazer RF_i é definida através do domínio do projeto, do domínio do sistema e através da função densidade de probabilidade, como se apresenta na Figura 3.4 [9] [4].

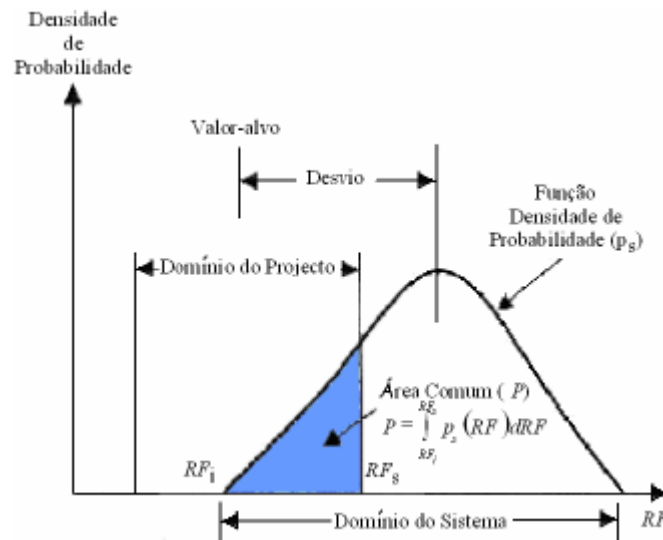


Figura 3.4- Cálculo da probabilidade de sucesso num projeto com um RF e um PP [4]

O domínio do projeto que define a gama aceitável associada ao parâmetro de projeto especificado e o domínio do sistema representa a capacidade do sistema atual em termos de variação [4].

O eixo vertical do gráfico apresentado na Figura 3.4, representa a função densidade de probabilidade e o eixo horizontal representa o requisito funcional, caso o mapeamento esteja a ser feito entre o domínio funcional e o domínio físico, ou parâmetro de projeto, caso o mapeamento esteja a ser a ser feito entre o domínio Físico e o domínio de Processo. A sobreposição do domínio de projeto com o domínio do sistema corresponde ao Domínio Comum, e é apenas nesta região que os requisitos funcionais são satisfeitos [9].

A probabilidade de sucesso de determinado Requisito Funcional, p , é então definida Equação 3.7, que consiste na divisão da área do Domínio Comum pela área do Domínio do sistema:

$$p = \frac{\text{Área Domínio Comum}}{\text{Área Domínio do Sistema}} \quad (3.7)$$

Sendo o conteúdo da informação dado pela Equação 3.8.

$$I = \log \left(\frac{\text{Área Domínio do Sistema}}{\text{Área Domínio Comum}} \right) \quad (3.8)$$

O Axioma da Informação, fornece um critério para tomar decisões que ao contrário de outras teorias para as tomadas de decisões existentes, não se baseia em fatores de ponderação arbitrários [14].

3.4. Engenharia Simultânea na Teoria Axiomática de Projeto

No processo de projeto, segundo uma ambiente de engenharia tradicional, o mesmo ocorre em três fases sequenciais: a fase conceptual, o projeto do produto e o projeto do processo [13]. A aplicação da Teoria Axiomática de Projeto em conjunto com a metodologia de Engenharia Simultânea tem como objetivo a execução em paralelo das fases presentes no processo de projeto. A Figura 3.5 representa o modo como as tarefas de projeto podem ser desenvolvidas, de acordo com a dependência entre as mesmas.

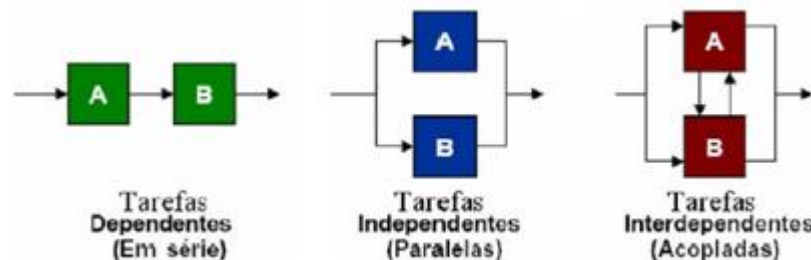


Figura 3.5 – Modos de encadear as tarefas de um projeto [4].

Para a aplicação da Engenharia Simultânea durante as tarefas de projeto é necessário garantir a satisfação do primeiro axioma da TAP. Ao garantir a independência dos parâmetros de projeto em todos os níveis da hierarquia e em todos os domínios possibilita-se o desenvolvimento de tarefas associadas a cada domínio de forma paralela, podendo-se afirmar que o grau de “simultaneidade” está dependente do grau de independência [4].

Segundo a metodologia de Engenharia Simultânea, a decomposição em zigue-zague é feita atravessando os três domínios, como representado na Figura 3.6.

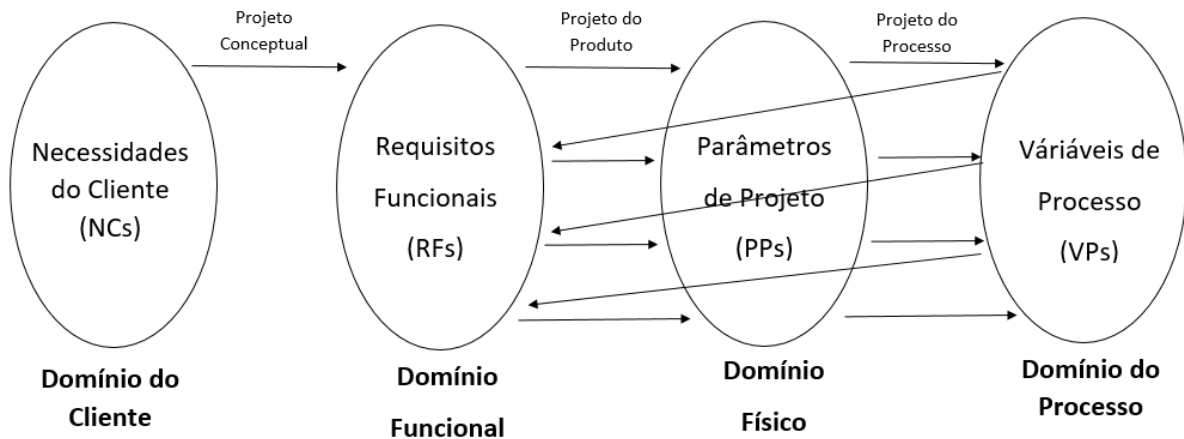


Figura 3.6- Decomposição em Zigue-Zague segundo Engenharia Simultânea [13]

Num ambiente de engenharia tradicional, a decomposição é feita primeiramente entre o domínio funcional e o domínio físico, passando depois para a decomposição entre o domínio físico e o domínio do processo, tratando-se, portanto, de um procedimento sequencial. Segundo a metodologia de Engenharia Simultânea esta decomposição ocorre entre os três domínios simultaneamente. Desta forma, o impacto de alterações impostas pelo mapeamento entre o domínio físico e o domínio de processo, podem ser tidas em conta em todos no mesmo nível hierárquico, reduzindo a necessidade de modificações tardias [4] [13].

4. Constrangimentos

4.1. Introdução ao Conceito

Durante o processo de projeto existe um conjunto de constrangimentos que impõem limitações e restrições ao mesmo [15]. O processo de projeto de um produto é condicionado pelos constrangimentos existentes e uma grande parte do processo de projeto envolve o reconhecimento, a formulação e a satisfação dos constrangimentos existentes [16].

Quanto mais constrangimentos um problema apresenta, menor será o conjunto de possíveis soluções que satisfazem esse problema [16]. Como referido no capítulo anterior, a teoria axiomática estabelece dois tipos de constrangimentos, os constrangimentos de entrada e os constrangimentos do sistema.

Os constrangimentos de entrada surgem da especificação do projeto, e normalmente são expressos como limites dimensionais, peso, materiais e custo. Os constrangimentos do sistema são impostos pelo sistema na qual a solução deve funcionar e estabelecem limites para a interação entre as soluções, podendo o que é considerado ser um Parâmetro de Projeto nos níveis hierárquicos superiores ser um constrangimento nos níveis mais baixos da hierárquica [16].

Os constrangimentos podem ser expressos três formas [16] [17]:

- Domínios;
- Equações;
- Regras.

Os domínios podem ser discretos e finitos ou contínuos e infinitos. Os domínios finitos são sempre expressos por um conjunto de valores permitidos para o parâmetro de projeto e os domínios infinitos correspondem a uma gama de valores permitidos [16]. Por exemplo, se o constrangimento para um determinado componente de um projeto for que o peso do mesmo tem de estar entre 20kg e 100kg, trata-se de um domínio contínuo e infinito, se o constrangimento for a marca exigida para esse componente, trata-se de um domínio discreto e finito.

Os constrangimentos expressos por equações, representam a relação funcional da modelação física dos parâmetros de projeto [16] [17], como por exemplo a segunda lei de Newton, $F = m \cdot a$. Se considerarmos num projeto de um sistema em que um parâmetro de projeto é o componente em movimento e outro parâmetro de projeto é o elemento responsável por exercer a força, que permite atingir determinada aceleração, então estes dois parâmetros de projeto estão relacionados pela equação da segunda lei de Newton, uma vez que a massa do parâmetro de projeto em movimento afetará a força necessária para transmitir uma determinada aceleração ao mesmo.

Os constrangimentos expressos por regras consistem em condições e conclusões [16], por exemplo, se uma peça tiver uma forma geométrica circular, o processo de maquinação disponível será o torneamento.

4.2. Relação entre constrangimentos

As variáveis de um Projeto estão normalmente ligadas entre si através de constrangimentos [17]. A relação entre um determinado conjunto de constrangimentos num problema de projeto pode ser representada de três formas: pela rede de constrangimentos, pela matriz de incidência Constrangimentos-Variáveis e pela matriz de adjacência [16].

A rede de constrangimentos consiste na recolha de constrangimentos que estão ligados por partilha de variáveis, como exemplificado na Figura 4.1.

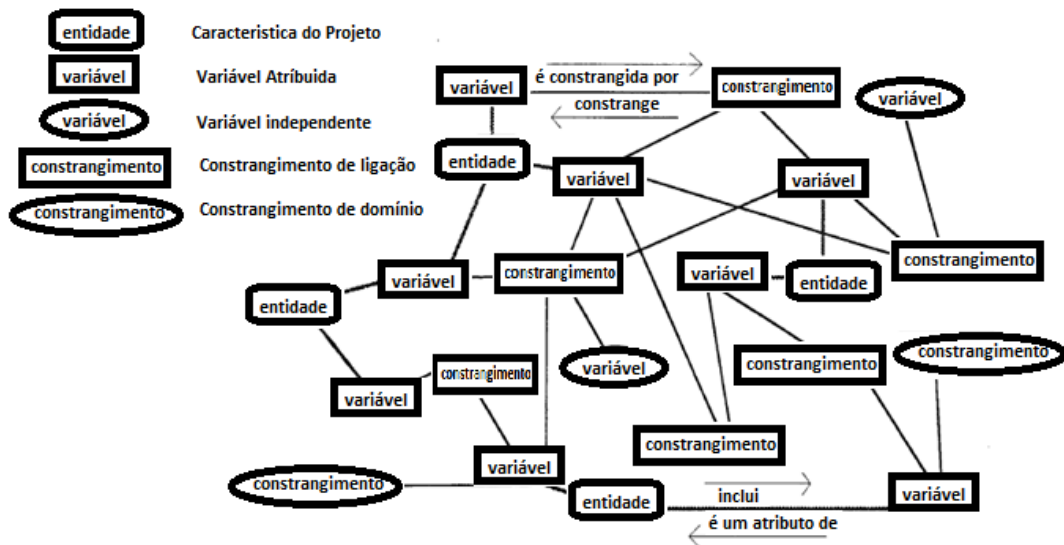


Figura 4.1 – Exemplo de uma rede de constrangimentos, adaptado de [17].

A rede de constrangimentos é útil para verificar se os constrangimentos estão a ser respeitados e para estabelecer a propagação desses constrangimentos ao longo do processo de projeto [16].

A matriz de incidência constrangimentos-variáveis e a matriz de adjacência estudam a relação entre os constrangimentos e as variáveis. Na Figura 4.2 estão representadas as três formas de representação de um grupo de constrangimentos.

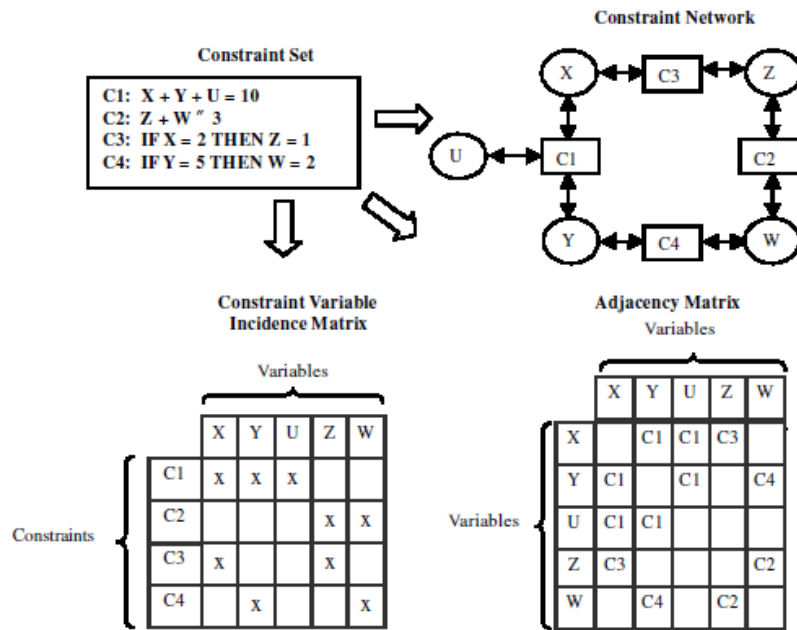


Figura 4.2- Exemplo de representação de um grupo de constrangimentos [16].

O objetivo destas matrizes é estudar a relação entre os constrangimentos e as variáveis de projeto, ajudando a estruturar o problema de projeto e a reduzir a necessidade de iterações.

4.3. Métodos de projeto baseados nos constrangimentos

Dado o processo de projeto ser condicionado pelos constrangimentos, têm sido desenvolvidos métodos de projeto baseados nos mesmos, podendo serem identificados três métodos [16].:

- Método da Verificação dos constrangimentos
- Método da Satisfação dos Constrangimentos
- Método da Otimização dos Constrangimentos

O método de verificação dos constrangimentos é utilizado para validar se as decisões tomadas satisfazem os constrangimentos. São atribuídos valores às variáveis do projeto e é verificado se algum dos constrangimentos não é cumprido, através da propagação dessas variáveis pela rede de constrangimentos, e vai-se repetindo o processo de atribuição de valores às variáveis até que se obtenha uma solução que respeite os constrangimentos [16].

O método de satisfação dos constrangimentos, utiliza os constrangimentos ativamente [16], uma vez que ao atribuir valores a algumas das variáveis de projeto resultam, com base no valor dessas variáveis e dos constrangimentos existentes, os valores que as restantes variáveis do projeto têm que assumir para satisfazer os constrangimentos existentes.

O método de otimização dos Constrangimentos pressupõe a formulação matemática dos objetivos e dos constrangimentos em variáveis de decisão [16]. São depois identificadas as variáveis que definem o projeto, e que devem ser independentes. Ao serem atribuídos valores a estas variáveis são obtidas diferentes soluções que devem ser comparadas e validadas pela função formulada através dos objetivos e constrangimentos do sistema. A otimização corresponde a obter os valores das variáveis de projeto para minimizar ou maximizar a função objetivo sujeita aos constrangimentos [16].

A metodologia proposta neste trabalho não recai sobre os métodos de projeto acima apresentados. Neste trabalho, propõe-se que seja avaliado de que modo os constrangimentos afetam cada proposta de solução e que a seleção seja feita com base nessa análise.

5. Análise da aplicação da TAP no projeto de produtos únicos

5.1. Análise do processo de projeto de produtos únicos

O processo de projeto inicia-se pela presença de uma necessidade, ou um conjunto de necessidades, do cliente, para as quais são estabelecidas as funcionalidades que o produto tem que ter para as satisfazer. Estas funcionalidades estabelecidas correspondem ao enunciado do problema [4]. Esta fase consiste na clarificação e planeamento do trabalho a desenvolver, sendo que para além das necessidades do cliente, devem ser tidos em conta os constrangimentos existentes que poderão condicionar as soluções a definir. Normalmente a maioria destes constrangimentos não são expostos pelo cliente. É da responsabilidade do projetista a identificação dos mesmos, por exemplo, constrangimentos dimensionais, fontes de energia disponíveis, ambiente em que a solução estará exposta, a legislação aplicável, etc. Projetistas com maior experiência tendem a identificar com maior facilidade os constrangimentos ao desenvolvimento do projeto. A definição dos requisitos funcionais é uma atividade de elevada importância, uma vez que serão os mesmos que garantem que as necessidades do cliente são satisfeitas.

O facto de existir uma fase de projeto do produto para possibilitar a venda do mesmo, influencia o processo de projeto deste tipo de produtos. É necessário estabelecer uma solução conceptual para promover a atividade comercial da venda do produto e dependendo do sucesso desta, prossegue-se para as fases seguintes do projeto, como representado na Figura 5.1.

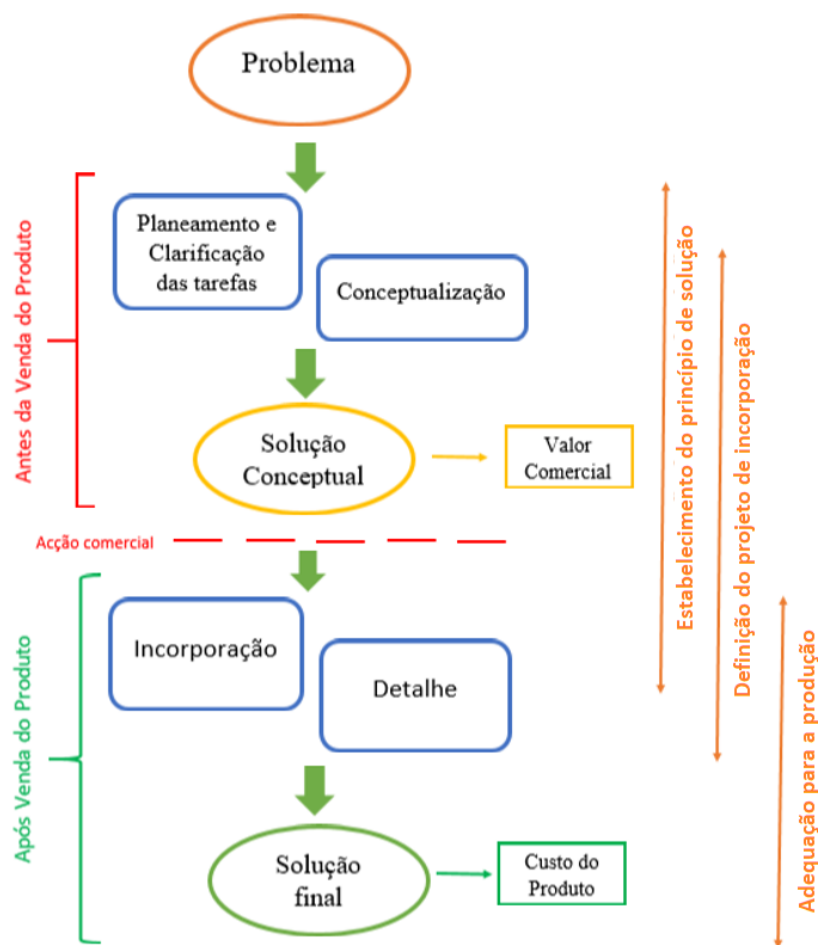


Figura 5.1-Representação das fases de projeto em função da atividade comercial.

Na fase clarificação e planeamento do trabalho a desenvolver, e de conceptualização, é estabelecida uma solução conceptual para o produto, que também pode ser denominado de ante-projeto [4]. É com base nesta solução conceptual que é feita uma estimativa para o valor comercial do produto. Os custos de projeto associados a esta fase terão que ser suportados pela empresa, sem garantias da venda do produto. Esta fase de projeto exige uma grande responsabilidade e também experiência do projetista, uma vez que a partir dela, são estabelecidos compromissos financeiros que têm de ser assegurados em caso de venda do produto. As melhorias à solução conceptual feitas já após a venda do produto, devem ser feitas tendo em consideração os custos que as mesmas possam representar.

Quando a venda do produto é realizada, prossegue-se com a fase de incorporação e projeto de detalhe, onde são interligadas e detalhadas todas as soluções definidas, para permitir que os requisitos funcionais do produto são garantidos. Esta fase requer também grande experiência por parte do projetista, para que as soluções estabelecidas sejam desenvolvidas e detalhadas garantido que possam ser fabricadas de um modo economicamente viável.

5.2. Desenvolvimento de produtos únicos baseado em projeto axiomático

Para a venda deste tipo de produtos, tem de existir uma fase conceptual, que permita estabelecer um valor comercial para o produto. Uma vez que os custos associados a esta fase são suportados pela própria empresa, o processo de desenvolvimento do produto só decorre até um determinado nível de detalhe que permita estabelecer uma estimativa para o custo do produto.

Nesta fase de projeto são identificadas as necessidades do cliente assim como os constrangimentos existentes e são estabelecidos os requisitos funcionais para satisfazer essas mesmas necessidades. Segue-se então para a decomposição entre o domínio funcional e o domínio físico, até atingir um nível de decomposição em que exista informação suficiente sobre os princípios de solução (parâmetros de projeto) para estabelecer um valor comercial para o produto.

A cada intervalo do projeto está naturalmente associado um custo. Existe o custo de desenvolvimento do produto, que inclui a fase conceptual onde são definidos os requisitos funcionais para satisfazer as necessidades dos clientes e os princípios de solução (*PPs*) capazes de cumprir estes requisitos, e a fase de incorporação e detalhe onde são integrados e detalhados todos os *PPs*. Existe depois o custo de produção da solução, que corresponde ao domínio do processo. Como durante a fase conceptual não é abrangida a totalidade do Ambiente do Projeto, para estabelecer um valor comercial para o produto, os custos associados aos domínios não abrangidos, têm de ser estimados.

Não existindo detalhe suficiente sobre os princípios de solução para que se possam definir, com precisão, os processos de fabrico e as especificações dos materiais a utilizar, são feitas considerações e aproximações para poder definir materiais e custos de produção.

Após a venda do produto, procede-se à fase de incorporação e detalhe, e posteriormente ao fabrico da solução. Na Figura 5.2 está representado no ambiente de projeto axiomático, os domínios abrangidos pela processo de projeto que ocorre antes da venda do produto e depois da venda do produto.

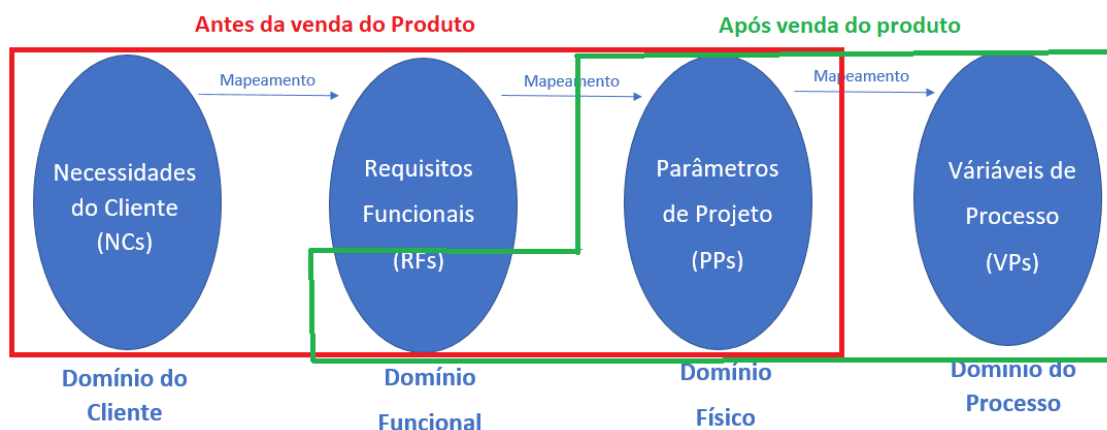


Figura 5.2 – Atividades de projeto de produtos únicos no ambiente da TAP em relação ao momento comercial do produto

Como se pode verificar na Figura 5.2, as atividades realizadas antes da venda e após a venda sobrepõem-se no domínio funcional e no domínio físico do ambiente de projeto. A sobreposição no domínio físico deve-se ao facto de os princípios de solução, *PPs*, serem definidos antes da venda do produto, mas a fase de incorporação e detalhe dos mesmos, só é feita após a venda do mesmo. A sobreposição no domínio funcional representa o processo iterativo que ocorre devido a necessidades que surgem após a venda do produto e que ocorrem idealmente a um nível mais baixo da hierarquia da solução.

O processo iterativo durante estas duas fases é natural, e ocorre muitas das vezes devido a conflitos com os constrangimentos de entrada e com os constrangimentos do próprio sistema e que só são identificados durante a incorporação e detalhe dos parâmetros de projeto.

Como o valor comercial do produto é estabelecido através das soluções definidas durante a fase conceptual, a necessidade de iterações em níveis hierárquicos elevados, da solução estabelecidos durante essa fase, pode comprometer os compromissos financeiros estabelecidos, não sendo, portanto, desejável. Por outro lado, pode também existir necessidade de uma alteração com o objetivo de melhorar um princípio de solução estabelecido na fase conceptual, tanto de um ponto de vista funcional como de um ponto de vista financeiro.

5.3. Princípios da Axiomática aplicados à fase de conceptual

A fase conceptual no projeto de produtos únicos, tem como objetivo estabelecer o conceito para o produto que se pretende colocar no cliente, e é com base neste conceito que são estabelecidos os compromissos financeiros para o desenvolvimento e construção do produto, assim como para o tempo necessário para o colocar em funcionamento. Perante estes objetivos nesta fase de projeto, é importante que sejam tomadas decisões que não os comprometam. Em primeiro lugar, os requisitos funcionais para o produto devem ser devidamente estabelecidos de modo a permanecerem estanques após a fase de conceptualização. Como enunciado no teorema 5 da TAP, quando um determinado conjunto de *RFs* é alterado, as soluções anteriormente definidas deixam de satisfazer esse novo conjunto de *RFs*, levando à necessidade de se estabelecer uma nova solução [9]. Este acontecimento numa fase de desenvolvimento do produto após a sua venda, pode comprometer os compromissos financeiros estabelecidos, assim como o prazo para a entrega do produto.

Para que se evite alterações durante uma fase mais avançada do projeto, para as soluções definidas a níveis hierárquicos superiores, é importante que, como estabelece o Corolário 6 da TAP, sejam especificados requisitos funcionais com tolerâncias o mais amplas possíveis [9], permitindo lidar com incertezas derivadas da falta de informação nesta fase do projeto.

Contudo, o processo iterativo é normal na atividade de projeto, e dado a falta de informação existente durante a fase de conceptualização é difícil garantir que os requisitos funcionais ou soluções de

projeto definidas para estes requisitos durante esta fase não tenham de ser alteradas ou ajustadas. Muitas vezes as alterações acontecem por problemas identificados durante o desenvolvimento das soluções ou por limitações para desenvolver as soluções definidas dentro dos constrangimentos existentes. Este processo iterativo também pode ocorrer com o objetivo de melhorar a funcionalidade das soluções ou os custos associados às mesmas.

Sendo o processo iterativo movido por necessidade de resolução de problemas identificados ou por necessidade de melhorar as soluções, é importante que o impacto do mesmo seja minimizado, ou seja, que as alterações a implementar, tenham o mínimo impacto nas restantes soluções já estabelecidas durante a fase conceptual. Para minimizar o impacto destas alterações, devem ser estabelecidas soluções que obedeçam ao axioma da independência, de preferência soluções desacopladas

Supondo que num produto com a decomposição hierárquica representada na Figura 5.2, estabelecida durante a fase conceptual, é necessário alterar um determinado parâmetro de projeto.

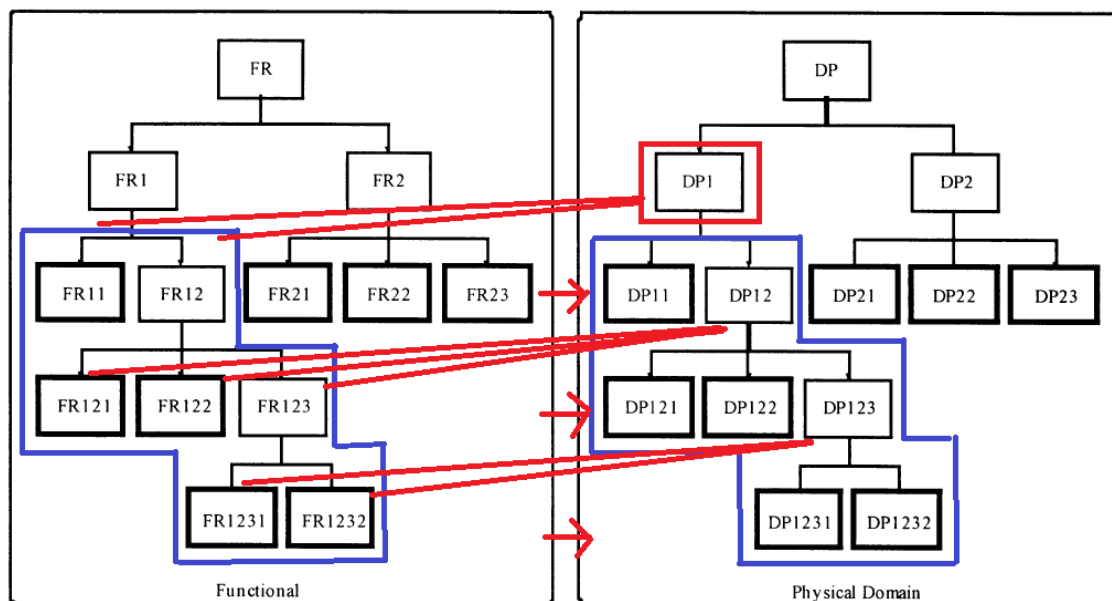


Figura 5.3 – Decomposição hierárquica de um produto e impacto das alterações a Parâmetros de Projeto, adaptado [14]

No caso de ocorrerem alterações no segundo nível hierárquico do projeto, por exemplo no parâmetro de projeto *PP1*, assumindo que *RF1* e *RF2* são independentes, estas alterações vão afetar todos os níveis abaixo de *PP1*. As alterações realizadas em níveis mais baixos da hierarquia do projeto, afetam um menor número de *PPs*, e a probabilidade destas alterações comprometerem os compromissos financeiros estabelecidos também diminuí.

Analisando novamente a Figura 5.2, a alteração no parâmetro de projeto *PP1* apenas afeta os níveis hierárquicos abaixo da mesma, se estivermos perante um projeto desacoplado em que *RF1* e *RF2*

são independentes e, portanto, a alteração num dos *PPs* destes requisitos funcionais, apenas afeta os níveis hierárquicos abaixo do mesmo. Caso se esteja perante um projeto acoplado, a alteração num destes parâmetros, *PP1* ou *PP2*, afetaria o outro, podendo levar à sua alteração e consequentemente os níveis hierárquicos abaixo do mesmo.

Se a matriz de projeto que estabelece a relação entre os requisitos funcionais *RF1* e *RF2* e os parâmetros de projeto *PP1* e *PP2*, fosse triangular, ou seja desacoplável, em que, por exemplo, *RF1* fosse afetado por *PP2*, mas *RF2* não seria afetado por *PP1*, uma alteração no parâmetro *PP2* poderia resultar na necessidade de alteração de *PP1* e consequentemente os níveis hierárquicos abaixo do mesmo. Por outro lado, uma alteração no parâmetro *PP1* não afetaria o requisito funcional *RF2*, podendo ser mantido o parâmetro *PP2*.

Portanto, durante a fase conceptual, ao se obedecer ao axioma da independência, diminui-se o impacto sobre compromissos estabelecidos durante a fase de conceptualização do produto, sendo que, preferencialmente, devem-se estabelecer soluções de projeto desacopladas.

O projeto de produtos únicos, dado à natureza deste tipo de produtos, apresenta um elevado grau de incerteza, uma vez que do projeto resultam soluções, possivelmente, nunca desenvolvidas. Ainda assim, os princípios de solução definidos, podem ter semelhanças com os de soluções anteriormente desenvolvidas, mas provavelmente sob constrangimentos diferentes. Portanto, é vantajoso sempre que possível optar por princípios de solução anteriormente utilizados, para os quais se conhece a probabilidade sucesso para satisfação de determinado requisito funcional sobre a influência de determinados constrangimentos, desde que obedeçam ao axioma da independência e, naturalmente, sejam adequados perante os novos constrangimentos existentes.

À semelhança dos princípios de solução, deve-se sempre que possível optar por soluções que consistam em componentes normalizados, como estabelece o Corolário 4 da TAP [9], desde que compatíveis com os requisitos funcionais existentes. A escolha de soluções normalizadas durante a fase conceptual do projeto apresenta algumas vantagens perante a escolha de soluções não normalizadas que necessitam de ser desenvolvidas. As mesmas possuem informação à partida disponível, que as soluções que necessitam de ser desenvolvidas e especificadas não apresentam, assim como, informação mais precisa em relação aos custos das mesmas e dos prazos para a sua implementação. Tanto a utilização de princípios de solução anteriormente utilizados como de componentes normalizados permite também reduzir os recursos necessários para a conceptualização do produto, e consequentemente, os custos associados, que são nesta fase suportados pela empresa.

5.4. Conclusão da análise

A utilização do axioma da informação para a seleção dos parâmetros de projeto requer a existência de uma quantidade de dados sobre as possíveis alternativas para determinado requisito funcional.

A recolha destes dados implica desenvolvimento dos possíveis parâmetros de projeto, o que naturalmente envolve utilização de recursos numa fase em que a venda do produto não está garantida. Assim, não é viável a aplicação do Axioma da Informação como ferramenta de seleção de soluções no projeto de produtos únicos.

Na Figura 5.4 estão apresentados os princípios da TAP que podem ser aplicados durante a fase conceptual de projeto de produtos únicos, para definição de requisitos funcionais e para a seleção de parâmetros de projeto.

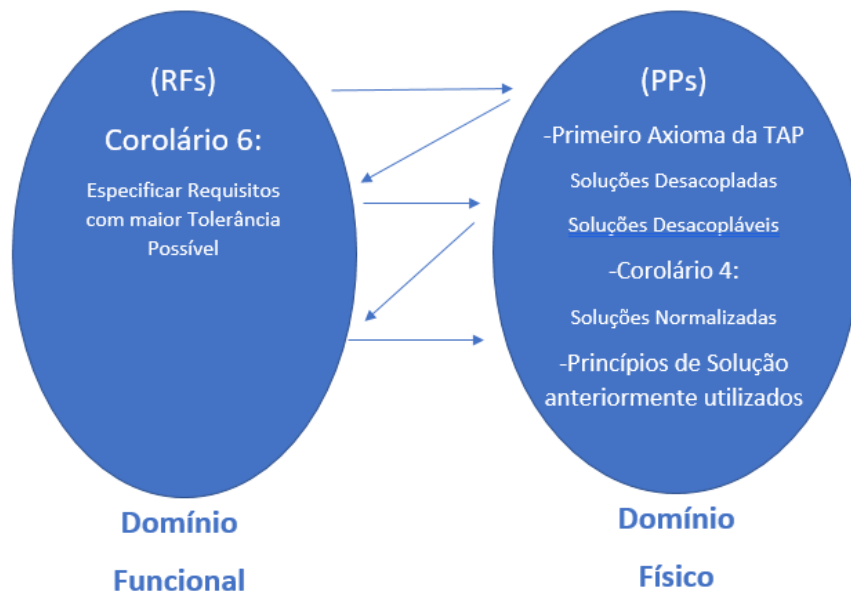


Figura 5.4 – Princípios da TAP aplicados ao Projeto de Produtos Únicos

Não sendo viável a aplicação do segundo axioma da TAP, o projeto de produtos únicos fica carecido de uma outra via que auxilie o processo de seleção de Parâmetros de projeto. Esta via deverá ser baseada nos dados existentes no ante-projeto e seguir o princípio da independência da TAP.

6. Metodologia para a seleção dos parâmetros de projeto

6.1. Introdução

A tomada de decisão é uma tarefa de grande responsabilidade na atividade de projeto. Os dois axiomas da teoria axiomática de projeto apresentam-se como ferramentas para guiar o processo de tomada de decisão ao longo do projeto, estabelecendo que quando existe mais que uma solução que satisfaz o axioma da independência, deve ser aplicado o axioma da informação.

O axioma da informação exige a existência de dados sobre as soluções alternativas, que apenas podem ser recolhidos com o desenvolvimento e o detalhe das mesmas. Assim sendo, o axioma da informação torna-se um método inviável para a seleção de parâmetros de projeto para produtos únicos durante a fase conceptual do projeto, uma vez que para a sua aplicação seriam despendidos recursos de projeto para os quais não é garantido retorno financeiro. Também por ser uma atividade demorada, pode inviabilizar a colocação de uma oferta no mercado num curto intervalo de tempo. A aplicação da TAP ao projeto de produtos únicos fica assim incompleta, existindo a necessidade de haver uma outra ferramenta que auxilie a tomada de decisão.

Como referido no Capítulo 4, dada a forma como os produtos únicos são comercializados, as iterações no projeto do produto podem comprometer compromissos anteriormente estabelecidos, sejam internos, como por exemplo o custo que se definiu para o produto, sejam externos como, por exemplo, o prazo de entrega definido com o cliente.

A necessidade destas iterações surge muitas vezes da identificação de conflitos dos *PPs* escolhidos, com os constrangimentos existentes, durante o desenvolvimento detalhado dos *PPs*, assim como de conflitos entre *PPs*, ou seja, conflitos com constrangimentos do sistema, resultantes de soluções anteriormente definidas.

Coloca-se então a questão: como completar a aplicação da TAP ao projeto de produtos únicos, com uma ferramenta que auxilie o processo de tomada de decisão e que diminua a necessidade de iterações numa fase de desenvolvimento das soluções?

A ferramenta irá consistir num processo de decisão que combinará os princípios da axiomática de projeto com uma avaliação do grau de conflito com os constrangimentos de entrada e os constrangimentos do sistema.

6.2. Fluxograma geral da metodologia

A metodologia proposta compreende 6 etapas sequenciais para a seleção dos *PPs* como mostrado na Figura 6.1.

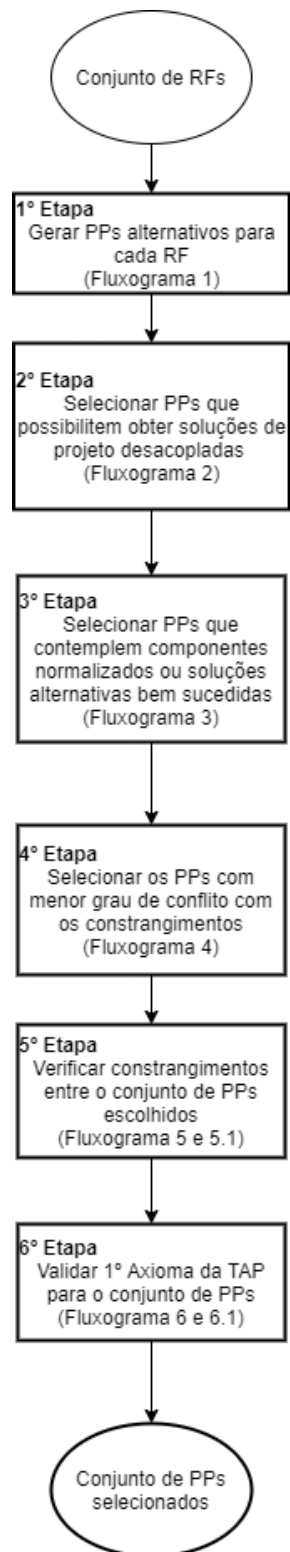


Figura 6.1- Fluxograma geral da metodologia para seleção de *PPs*

Numa primeira etapa pretende-se gerar soluções alternativas para cada RF e avaliar a quantidade de alternativas geradas. Na segunda etapa tem-se como objetivo promover a independência da solução de projeto, procurando entre as soluções alternativas para determinado RF , aquelas que não afetam os restantes. Na terceira etapa, selecionam-se os PPs que contemplam componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas. A quarta etapa tem como objetivo selecionar entre as alternativas remanescentes, as que apresentam um menor grau de conflito com os constrangimentos existentes.

Após estas quatro etapas haverá um conjunto de PPs selecionados, que serão validados na quinta etapa através da análise dos constrangimentos que apresentam entre si, verificando se existem soluções descartadas que melhoram estes constrangimentos. E, finalmente, na sexta etapa, é verificado se a solução de projeto escolhido respeita o axioma de independência, analisando a configuração da matriz de projeto e verificando, caso a matriz não seja diagonal ou triangular, se foram ignorados PPs que transformam a matriz de projeto para uma destas configurações.

6.3. 1ª Etapa: Gerar soluções alternativas para RF_i

Nesta etapa pretende-se gerar soluções alternativas para cada PP . Considerando um conjunto N de RFs , em que RF_i ($i = 1, \dots, N$), é um determinado requisito funcional desse conjunto. Esta etapa é descrita pelo Fluxograma 1, representado na Figura 6.2.

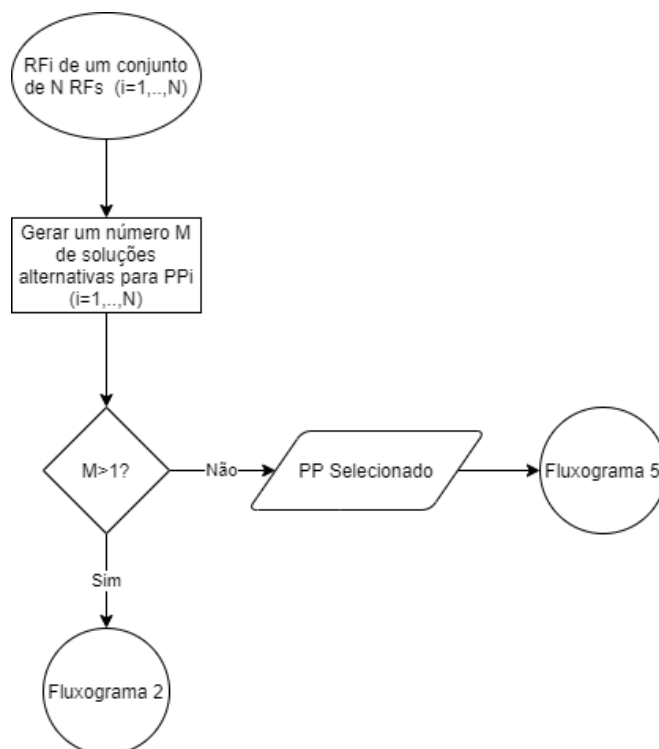


Figura 6.2 – Fluxograma 1: Gerar soluções alternativas

Deste processo resulta um conjunto de M soluções alternativas para PP_i , que caso seja esse conjunto seja igual a um, será esse o PP selecionado para o respectivo RF , passando o mesmo para o fluxograma 5, que corresponde à etapa de verificação dos constrangimentos entre o conjunto de PPs selecionados. Caso o conjunto M seja superior a um, passa-se então para seguinte fase de seleção da metodologia, o fluxograma 2.

6.4. 2ª Etapa: Selecionar PPs que não afetem os restantes RFs

Com esta etapa de seleção, pretende-se promover a independência na solução de projeto. Tendo um conjunto M de soluções alternativas, pretende-se avaliar as alternativas para $PP_{i(j)}$ ($i = 1, \dots, N ; j = 1, \dots, M$), que não afetam RF_k ($k = 1, \dots, N ; k \neq i$), sendo este processo descrito pelo Fluxograma 2 representado na Figura 6.3.

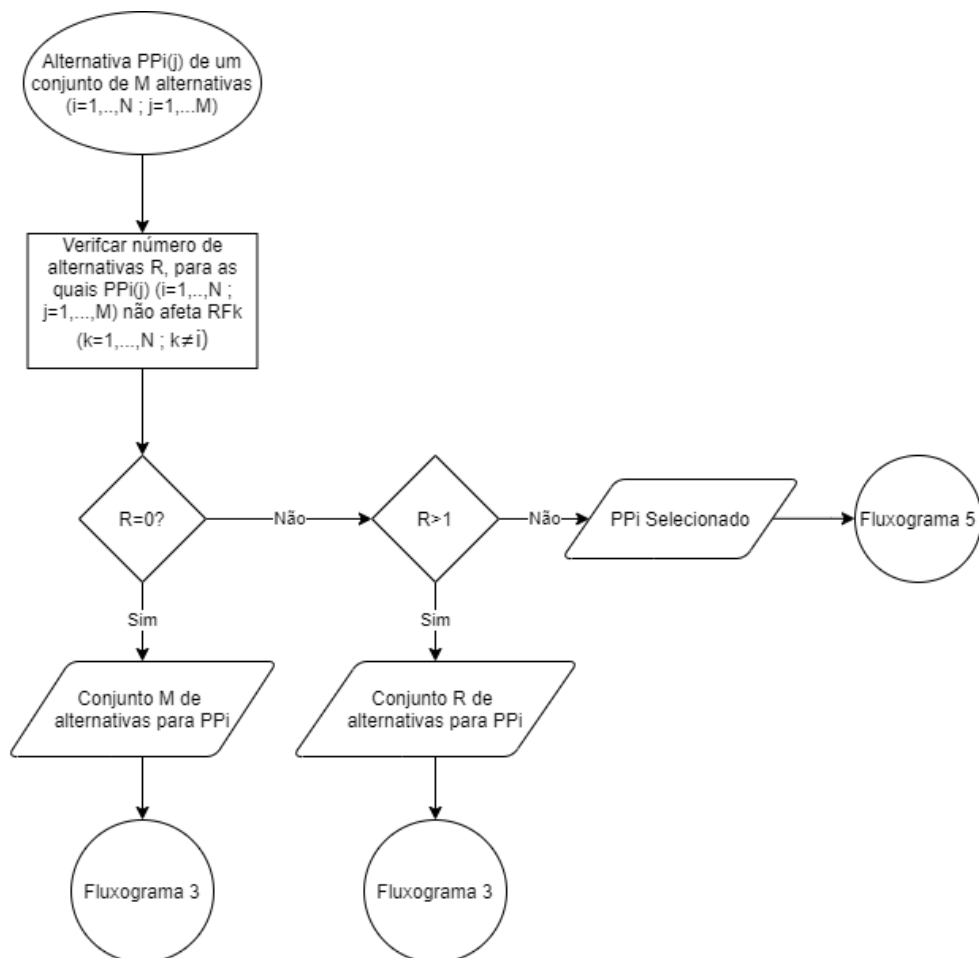


Figura 6.3 – Fluxograma 2: Selecionar PPs que não afetam restantes RFs

Caso não se verifique a existência de soluções alternativas com esta característica, permanece-se com o conjunto M de alternativas, passando o conjunto para o processo de seleção seguinte descrito

pelo fluxograma 3. Caso exista mais que uma alternativa que valide esta condição, ter-se-á um conjunto R de alternativas, passando este conjunto também para o processo de seleção descrito pelo fluxograma 3. Por último, se existir apenas uma solução alternativa que respeite esta condição, a mesma corresponde ao PP selecionado, passando para o processo de verificação dos constrangimentos entre o conjunto de PPs selecionados, descrito pelo fluxograma 5.

6.5. 3ª Etapa: Selecionar PPs que contemplem componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas

A utilização de componentes normalizados é sugerida pelo Corolário 4 da TAP. A definição de soluções com componentes normalizados no projeto de produtos únicos apresenta grandes vantagens, uma vez que diminui a incerteza que é uma característica evidente no projeto deste tipo de produtos, assim como contraria a escassez de informação que existe nesta fase pouco detalhada do projeto.

À semelhança dos componentes normalizados, a reutilização de soluções anteriormente utilizadas e que foram bem sucedidas, apresenta as mesmas vantagens face aos problemas relacionados com a incerteza da funcionalidade das soluções e da falta de informação existente.

Nesta etapa da metodologia, descrita pelo Fluxograma 3 da Figura 6.4, pretende-se selecionar do conjunto de alternativas existentes, podendo ser o conjunto M ou R , os $PP_{i(j)}$ ($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$ ou R), que contemplem componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas.

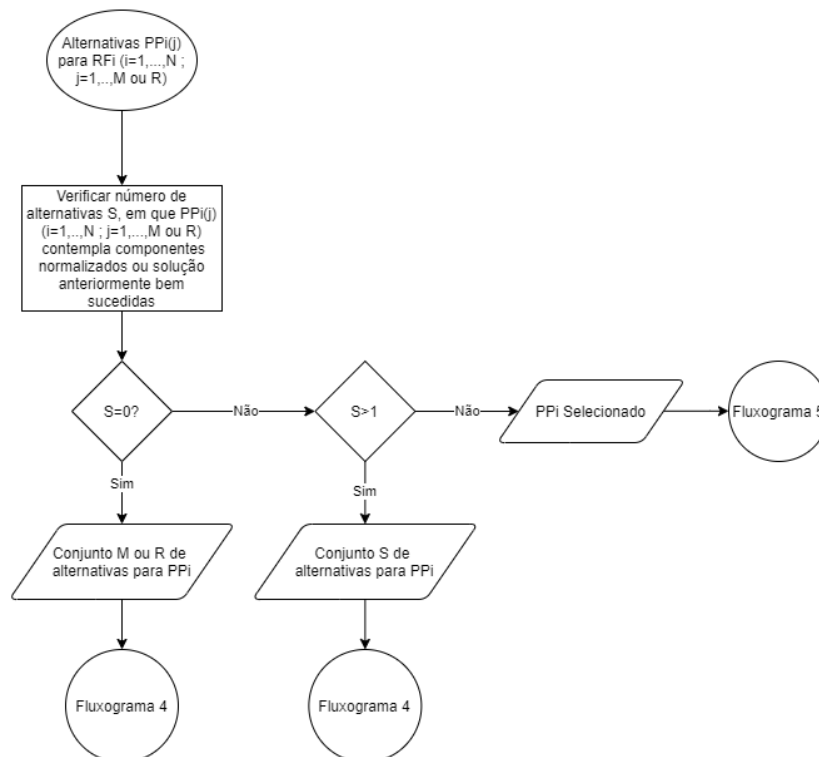


Figura 6.4 – Fluxograma 3: Seleção de PPs que contemplem componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas

Após este processo, se não se verificarem soluções que correspondam a esta condição, permanece-se com um conjunto M ou R de alternativas, dependendo da origem do conjunto analisado no início deste processo, passando o mesmo para a etapa de seleção descrita pelo fluxograma 4. Se existir mais do que uma solução alternativa nestas condições, ter-se-á um conjunto S de soluções alternativas, que devem também seguir para o processo de seleção descrito no fluxograma 4. Se existir apenas uma alternativa nestas condições, a mesma corresponde ao PP selecionado, que deve seguir para a etapa de validação descrita pelo fluxograma 5.

6.6. 4ª Etapa: Selecionar soluções com o menor grau de conflito com os constrangimentos

6.6.1. Grau de conflito dos PPs com os constrangimentos

A definição das soluções de projeto é condicionada pelos constrangimentos existentes. Perante um problema de projeto nem sempre é possível definir PPs que se mantenham indiferentes aos constrangimentos, ou seja, que os mesmos não condicionem o desenvolvimento e o detalhe das soluções.

É possível admitir que para um requisito funcional para o qual existe um conjunto de soluções alternativas que são condicionadas por um determinado número de constrangimentos, existirá uma alternativa que será mais facilmente desenvolvida perante os constrangimentos existentes.

Propõe-se então que para cada solução alternativa seja atribuído um grau de conflito perante determinado constrangimento, valor este que deve ser comparativo com o das restantes soluções alternativas.

Considere-se que para o requisito funcional RF_1 , têm-se as alternativas de solução PP_{1A} , PP_{1B} e PP_{1C} , condicionadas pelos constrangimentos C_1 , C_2 e C_3 . Prevê-se que perante o constrangimento C_1 , a solução PP_{1A} é a que apresentará mais dificuldades de ser desenvolvida, ou seja, é a que apresenta um maior grau de conflito com o constrangimento em questão, ainda assim, perante este mesmo constrangimento prevê-se que a solução PP_{1C} seja mais facilmente desenvolvida do que a solução PP_{1B} . Os valores para o grau de conflito com o constrangimento C_1 estão representados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Grau de conflito das soluções alternativas para RF_1 perante o constrangimento C_1

RF_1	Soluções alternativas		
	PP_{1A}	PP_{1B}	PP_{1C}
Constrangimento	Grau de conflito		
C_1	3	2	1

Como se pode verificar na tabela, foi atribuído um valor ao grau de conflito comparativo entre as diferentes soluções e relativamente ao constrangimento em causa. Supondo que perante o

constrangimento C_2 , a solução PP_{1B} e PP_{1C} apresentariam a mesma dificuldade de desenvolvimento, mas ainda assim menos dificuldades do que a solução PP_{1A} . O grau de conflito das soluções alternativas perante o constrangimento C_2 pode ser representado conforme a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Grau de conflito das soluções alternativas RF_1 perante o constrangimento C_2

RF_1	Soluções alternativas		
	PP_{1A}	PP_{1B}	PP_{1C}
Constrangimento	Grau de conflito		
C_2	2	1	1

Analisando a Tabela 6.2, o valor do grau de conflito com o constrangimento C_2 é igual para a solução PP_{1B} e PP_{1C} e superior a este valor para a solução a solução PP_{1A} .

Considerando que o C_3 não interfere em nenhuma das soluções, ou seja, não condiciona o seu desenvolvimento, o valor do grau de conflito com o constrangimento é zero para todas as soluções. Na Tabela 6.3 está representado o grau de conflito das três soluções alternativas perante os três constrangimentos.

Tabela 6.3 - Grau de conflito das soluções alternativas RF_1 perante os constrangimentos

RF_1	Soluções alternativas		
	PP_{1A}	PP_{1B}	PP_{1C}
Constrangimento	Grau de conflito		
C_1	3	2	1
C_2	2	1	1
C_3	0	0	0
Σ	5	3	2

Como se pode verificar, a solução PP_{1C} é a que apresenta um somatório de graus de conflito menor, por isso considera-se a melhor alternativa entre as propostas.

6.6.2. PPs de níveis hierárquicos superiores avaliados como constrangimentos

À semelhança da avaliação do grau de conflito com os constrangimentos de entrada, os conflitos com os constrangimentos do sistema devem também ser considerados ao longo da decomposição da solução. A representação dos constrangimentos do sistema só é possível ser realizada com o desenvolvimento das soluções selecionadas. Numa fase conceptual do projeto não é possível obter esse detalhe sobre as soluções, portanto a presente metodologia propõe a avaliação do grau de conflito com os PPs

definidos nos níveis hierárquicos superiores como que se tratassem de constrangimentos aos parâmetros de projeto a serem definidos.

6.6.3. Atribuição de fator de relevância aos constrangimentos em soluções com o mesmo grau de conflito

Assumindo que para um requisito funcional RF_2 , os graus de conflito com os constrangimentos seriam de acordo com o que está representado na Tabela 6.4, em que o somatório dos graus de conflito das soluções $PP_{2(2)}$ e $PP_{2(3)}$ apresenta o mesmo valor.

Tabela 6.4 - Grau de conflito das soluções alternativas para RF_2 perante os constrangimentos

RF_2	Soluções alternativas		
	$PP_{2(1)}$	$PP_{2(2)}$	$PP_{2(3)}$
Constrangimento	Grau de conflito		
C_1	3	1	1
C_2	2	0	1
C_3	1	1	0
$\sum_{i=1}^n (C_i), n = n^o \text{ de constrangimentos}$	5	2	2

Sobre esta forma de análise, assume-se que o impacto que os constrangimentos têm sobre as soluções é igual, quando na verdade algum dos constrangimentos pode dificultar mais a tarefa de desenvolvimento da solução do que outro.

No caso de existirem soluções com um somatório de graus de conflito igual, propõe-se então que se atribua um fator de relevância, a cada constrangimento, que seja comparativo entre os mesmos, e cujo valor deve ser multiplicado pelo respectivo grau de conflito. Consideremos que para os constrangimentos da Tabela 6.4, o constrangimento C_1 se apresentava como mais relevante que C_3 , ou seja, apresentaria mais dificuldades ao desenvolvimento da solução para o RF_2 , e que C_3 se apresentava mais relevante do que C_2 . Na

Tabela 6.5 apresenta-se o fator de relevância dos constrangimentos aplicados sobre o respectivo grau de conflito com as soluções alternativas selecionadas.

Tabela 6.5 - Grau de conflito das soluções alternativas para RF_2 perante os constrangimentos com fator de relevância atribuído

RF_2		Soluções alternativas	
		$PP_{2(2)}$	$PP_{2(3)}$
Constrangimento (C)	Fator de relevância (fr)	Grau de conflito	
C_1	3	3	3
C_2	1	0	1
C_3	2	2	0
$\sum_{i=1}^n (C_i fr_i), n = n^o \text{ de constrangimentos}$		13	10

A solução $PP_{2(3)}$ apresentava-se como a melhor alternativa, uma vez que perante os constrangimentos de maior relevância, era a que apresentava um menor grau de conflito.

Quando após esta avaliação, existem soluções que apresentam o mesmo grau de conflito, assume-se que qualquer uma se apresenta como uma solução viável, podendo existir outros critérios, não considerados nesta metodologia, para optar por uma solução em prol de outra, por exemplo, estéticos, de segurança, de peso, de espaço ocupado, etc.

6.6.4. Fluxograma de seleção dos PPs com o menor grau de conflito com os constrangimentos

Seguindo o critério de avaliação descrito anteriormente, nesta etapa, representada na Figura 6.5 pelo fluxograma 4, pretende-se selecionar entre o conjunto de alternativas remanescentes, que pode corresponder a um conjunto M , R ou S , o parâmetro de projeto que apresenta um menor grau de conflito com os constrangimentos.

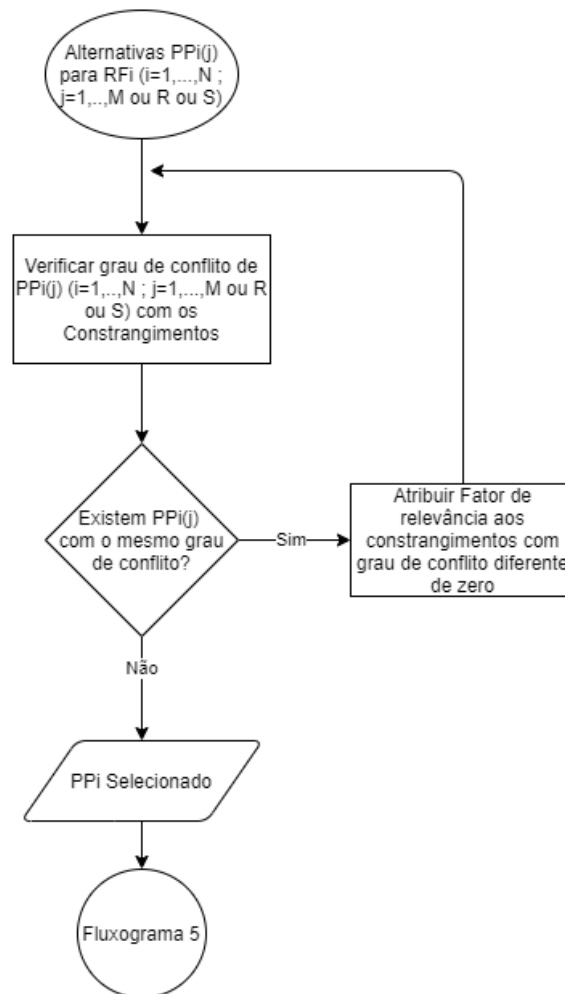


Figura 6.5 – Fluxograma 4: Selecionar as soluções com menor grau de conflito com os constrangimentos

Deste processo resulta o parâmetro de projeto selecionado, que segue para o processo de validação definido pelo fluxograma 5

6.7. 5ª Etapa: Validar constrangimentos entre o conjunto de *PPs* selecionados

6.7.1. Matriz de constrangimentos dos *PPs* selecionados

Os *PPs* para uma determinada solução podem apresentar relações entre eles, como por exemplo, a ligação física entre os mesmos, o movimento de um *PP* relativamente a outro, etc. É por isso, considerando importante na presente proposta metodológica avaliar o conflito entre o conjunto de *PPs* selecionado.

Considerando por exemplo que para os requisitos funcionais RF_1 , RF_2 e RF_3 foram selecionadas as alternativas de solução PP_1 , PP_2 e PP_3 onde a solução PP_1 constrangeria o desenvolvimento da solução PP_2 , e vice-versa, mas que não constroem o desenvolvimento da solução PP_3 , Na Tabela

6.6 apresenta-se a relação em forma de matriz, entre o conjunto de *PPs* indicando a presença de constrangimento entre os mesmos

Tabela 6.6 – Matriz de constrangimentos entre *PPs*

	PP_1	PP_2	PP_3
PP_1	-	C	0
PP_2	C	-	0
PP_3	0	0	-

Os elementos da matriz são preenchidos com o número "0", no caso de um parâmetro de projeto não constranger outro, ou pela letra "C" no caso de existir constrangimentos entre *PPs*.

A presente metodologia propõe que na presença de elementos diferentes de zero na matriz de constrangimentos entre *PPs* que sejam avaliadas se as soluções alternativas eliminam a presença destes constrangimentos. Caso se confirme a eliminação, estas alternativas devem ser novamente analisadas pelos métodos anteriormente descritos.

6.7.2. Fluxograma de validação dos constrangimentos entre o conjunto de *PPs*

Esta etapa de validação dos parâmetros de projeto é descrita pelo Fluxograma 5 representado na Figura 6.6, na qual consiste numa primeira fase, em avaliar a matriz de constrangimentos descrita anteriormente.

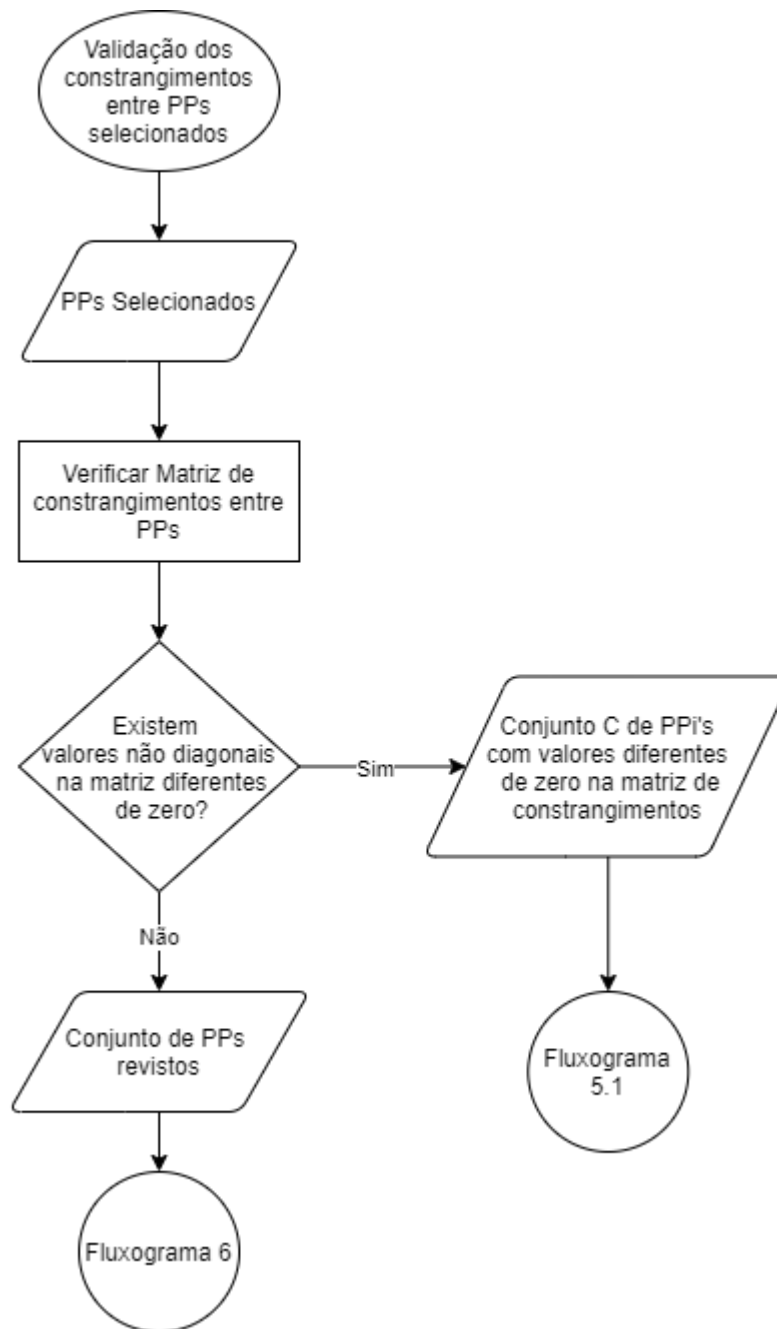


Figura 6.6 – Fluxograma 5: Validação dos constrangimentos entre os *PPs* selecionados

Após análise da matriz de constrangimento, se não existirem valores não diagonais diferentes de zero, capta-se o conjunto de *PPs* revistos, que podem passar para a última etapa de validação, correspondente ao Fluxograma 6. Se forem verificados elementos não diagonais diferentes de zero, deve-se verificar quais os *PPs* em que o constrangimento é diferente de zero, que será um conjunto *T* de *PPs*, que devem ser avaliados segundo o processo definido pelo Fluxograma 5.1 representado na Figura 6.7.

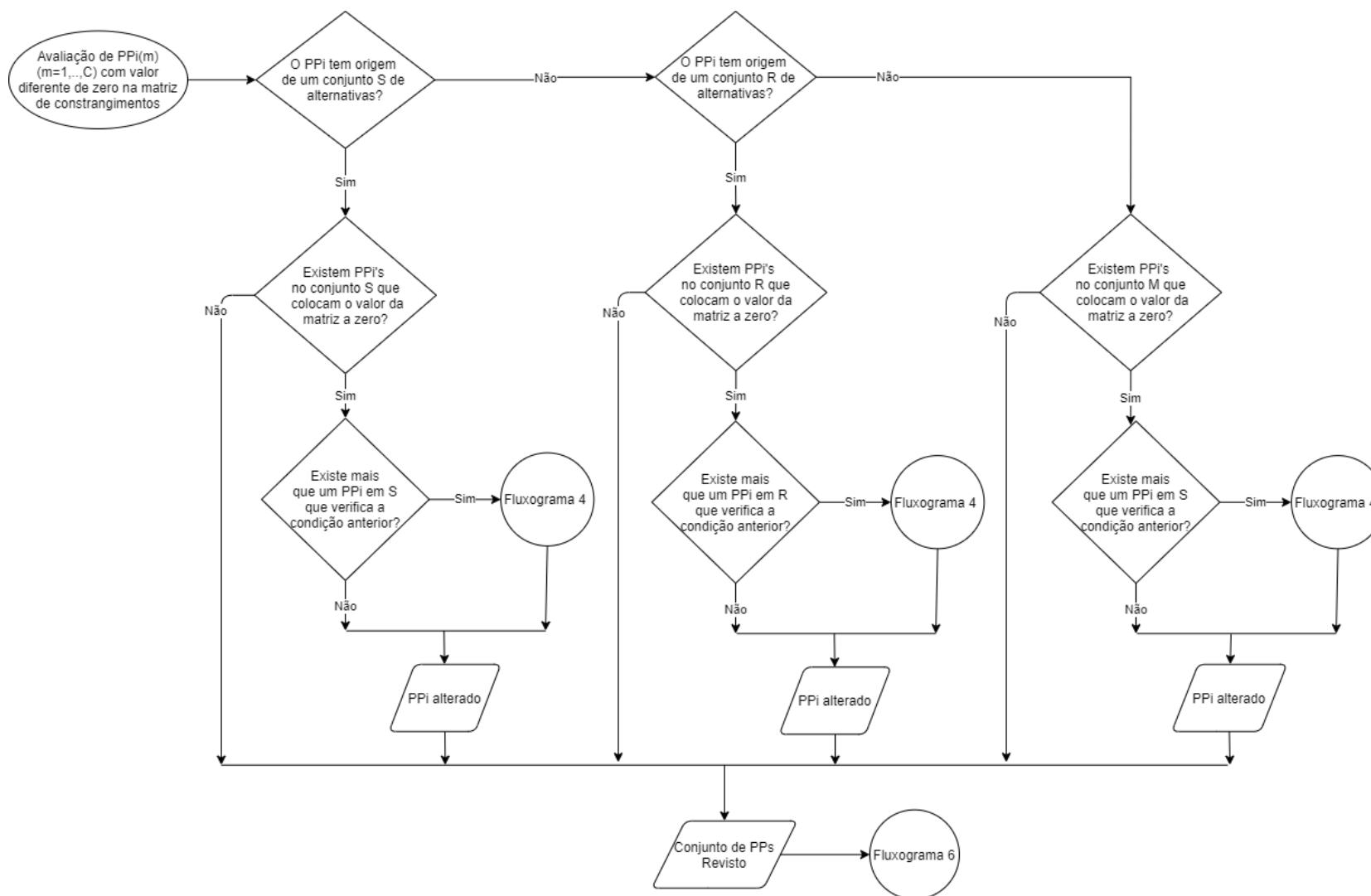


Figura 6.7 – Fluxograma 5.1: Verificação dos PPs com constrangimentos diferentes de zero entre si

Primeiro, pretende-se verificar se o *PP* em avaliação, pertence a um conjunto S , caso pertença, deve-se verificar se existem alternativas remanescentes nesse conjunto que colocam o valor da matriz a zero, se não existirem alternativas nesse conjunto que satisfaçam essa condição, mantém-se o *PP* selecionado, caso exista apenas uma alternativa, altera-se o *PP* para a mesma e, caso haja mais que uma alternativa que colocam o valor da matriz de constrangimentos a zero, recorre-se ao Fluxograma 4 para a seleção de uma dessas alternativas.

O procedimento repete-se caso o parâmetro de projeto pertença a um conjunto R ou M . Com esta abordagem pretende-se que as soluções que contemplem componentes normalizados e soluções anteriormente bem sucedidas, assim como soluções que não afetem os restantes *RFs* do sistema, prevaleçam, ainda que possam apresentar maior constrangimentos entre *PPs*.

No final deste processo pretende-se obter um conjunto de *PPs* revisto, que deverá ser validado na última etapa da metodologia, definida pelo Fluxograma 6.

6.8. 6ª Etapa: Validação pelo 1º Axioma da TAP

Na etapa final da metodologia, pretende-se que seja feita a avaliação da Matriz de Projeto para os *PPs* selecionados. e que seja avaliada a sua configuração de modo a verificar se o Axioma da Independência da TAP é respeitado. Após esta avaliação, se a matriz de projeto dos parâmetros selecionados não corresponder a um projeto desacoplado ou desacoplável, pretende-se verificar se foram ignorados *PPs* que permitam atribuir uma configuração triangular à matriz. A configuração diagonal, ou seja, um projeto desacoplado, não será possível de obter, pois a segunda etapa da metodologia assegura que os *PPs* que permitem obter um projeto desacoplado, sejam os primeiros a ser escolhidos.. Esta etapa da metodologia é descrita pelo Fluxograma 6 representado na Figura 6.8.

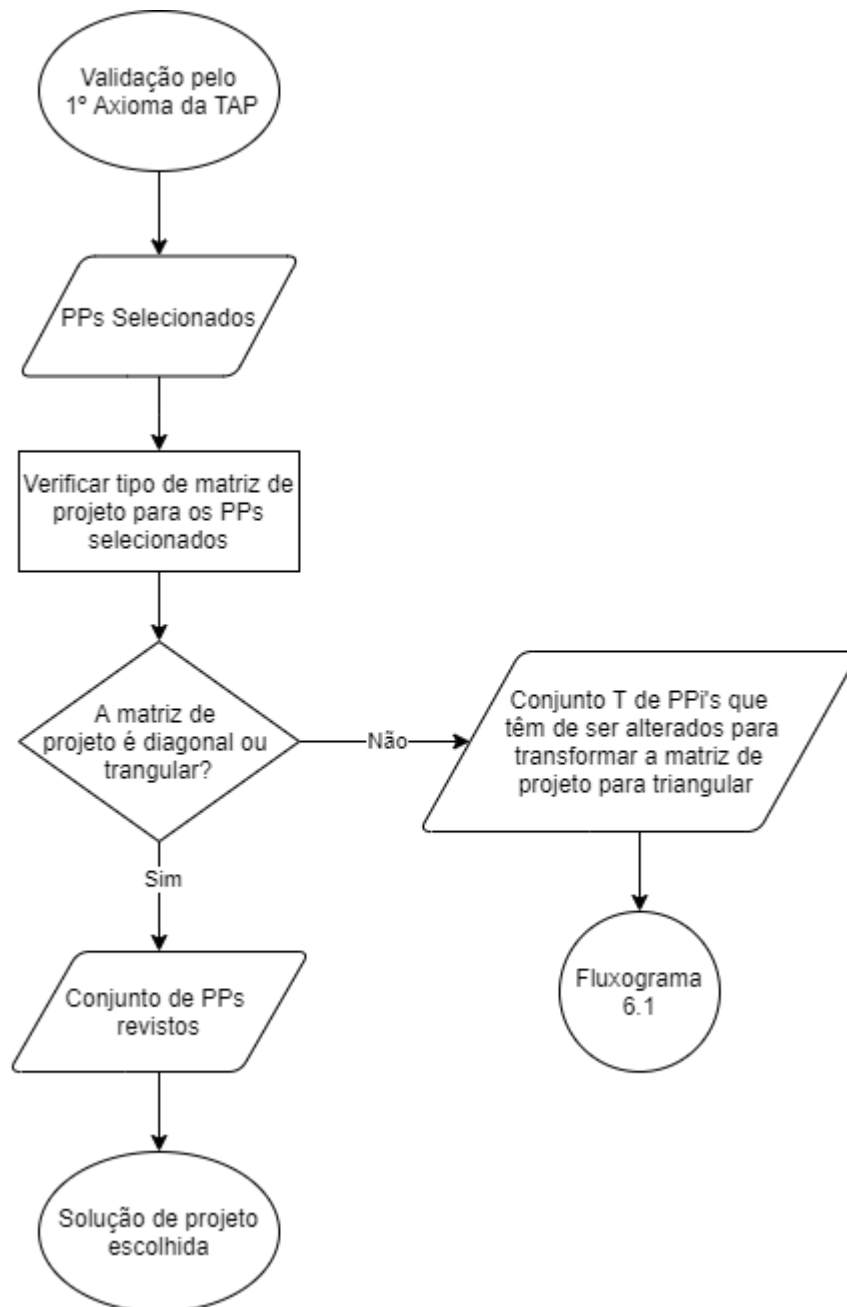


Figura 6.8 – Fluxograma 6: Validação pelo 1º Axioma da TAP

Se a matriz de Projeto for diagonal ou triangular, o conjunto de *PPs* estão revistos e temos a solução de projeto escolhida. Caso a matriz não corresponda a uma destas configurações, têm que ser verificados os *PPs* que devem ser alterados para que a matriz de projeto possa ser triangular, que será um conjunto *T* de *PPs* que devem ser revistos através do processo descrito pelo Fluxograma 6.1, representado na Figura 6.9.

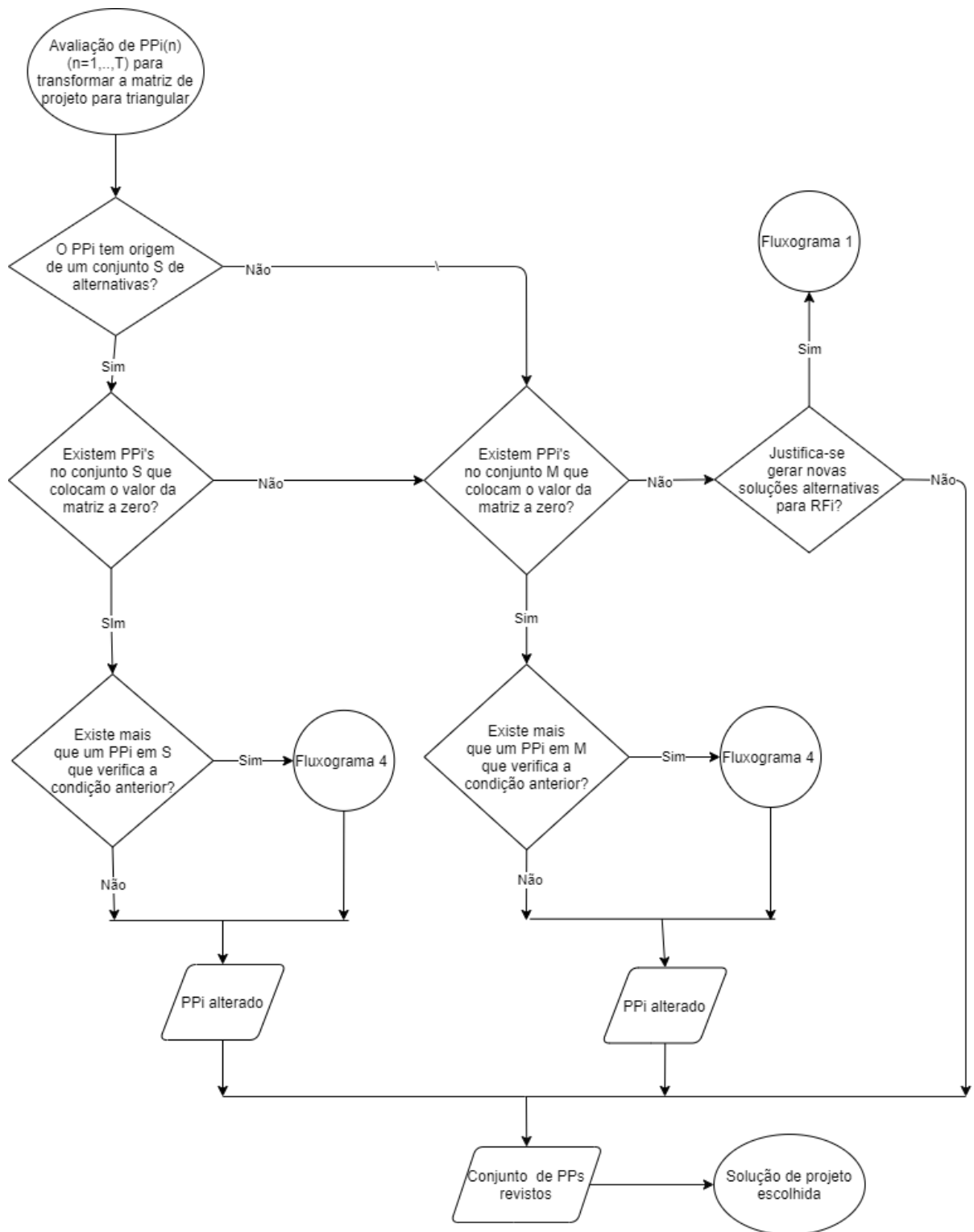


Figura 6.9 - Fluxograma 6.1: Revisão dos *PPs* que podem transformar a Matriz de Projeto em triangular

Ao contrário do procedimento de validação dos constrangimentos entre *PPs*, nesta etapa o que prevalece é o cumprimento do Axioma da Independência. As alternativas do conjunto *R* não são consideradas nesta avaliação, porque caso existissem teriam sido as seleccionadas e consequentemente os seus

valores na matriz de projeto são iguais a zero. Numa primeira fase, verificar se o PP que deve ser alterado de modo a transformar a matriz de projeto em triangular, pertence a um conjunto S de alternativas, se assim for, deve ser procurada uma solução nesse conjunto que coloque os elementos da matriz a zero, caso contrário, devem ser procuradas soluções que satisfaçam essa condição no conjunto M . Se a solução pertencer ao conjunto S mas não existirem soluções que coloquem os elementos da matriz de projeto a zero, devem então ser procuradas soluções no conjunto M que satisfaçam esta condição. Caso haja mais que uma alternativa que transforme a matriz de projeto na configuração desejada, quer no conjunto S e M , devem ser selecionadas através do procedimento descrito pelo Fluxograma 4. Se não existirem soluções, quer num conjunto quer noutro, que satisfaçam esta condição, deve-se avaliar se é possível e justificável gerar soluções alternativas para RF_i voltando ao fluxograma 1 da metodologia, ou então manter o PP .

No final deste procedimento deseja-se validar, ou obter, a solução de projeto final, garantindo que não são desprezadas soluções que são consideradas, pelo axioma da independência da TAP, como as melhores soluções de projeto.

7. Caso de Estudo

7.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se um caso de um projeto de produto único, mostrando a aplicação da metodologia de seleção dos parâmetros de solução com Base nos Constrangimentos ao longo da decomposição do projeto. Trata-se de uma solução que tinha como principal funcionalidade a transferência de uma carga de uma determinada posição para outra.

7.2. Enunciado do problema

Num armazém, chegavam cargas sobre carruagens movimentadas por meio de um veículo de movimento automatizado, por um percurso predefinido. Era necessário que a carga fosse retirada deste sistema de transporte e colocada num transportador de rolos existente, de forma automática. Poderiam chegar no máximo duas carruagens ao local onde se pretendia fazer esta movimentação da carga, sendo que poderiam vir com carga ou sem a mesma. Na Figura 5.1 está apresentado um esboço do esquema do problema acima descrito.

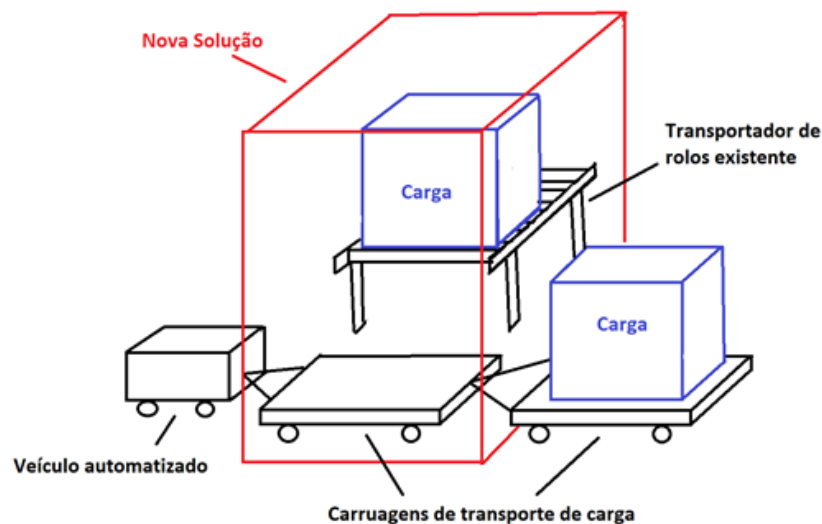


Figura 7.1 – Esboço esquemático do enunciado do problema

7.3. Constrangimentos (Cs)

A carga que se pretendia movimentar apresentava um peso máximo e poderia ter configurações geométricas diferentes, mas todas as configurações apresentavam encaixes na base para possibilitar a movimentação.

As cargas eram transportadas através de carruagens engatadas a um veículo de movimento autónomo por percursos predefinidos e com paragens programáveis em determinadas posições. Este veículo não possuía qualquer comunicação com os sistemas exteriores nem oferecia essa possibilidade.

Tratava-se de um sistema completamente autônomo deslocando-se através da leitura de uma fita magnética no piso, que definia o seu percurso, existindo em determinados pontos dessa mesma fita, informações que desencadeavam ações no automatismo do veículo como, por exemplo, a paragem do mesmo, num desses pontos, durante um determinado tempo.

A chegada de cargas à zona onde se pretendia efetuar a transferência da carga dava-se consoante uma determinada cadência, levando a que a solução tivesse que obedecer a um determinado tempo de ciclo. O veículo possuía também um sistema de deteção de obstáculos, com um determinado alcance, que quando atuado fazia com que o veículo parasse o seu movimento, quando este sistema deixava de ser atuado, o veículo prosseguia o seu percurso normalmente.

Não era assegurada a uniformidade da disposição da carga sobre a carruagem, podendo a mesma chegar ao destino de transferência mal-acondicionada.

O local a colocar a carga consistia num transportador de rolos que se encontrava a uma altura superior em relação ao ponto de recolha e o espaço para implementação da solução estava limitado por outros elementos presentes na instalação

Da análise da situação, enunciaram-se os seguintes constrangimentos (C_s):

- C_1 Peso máximo das cargas
- C_2 Configuração geométrica da carga
- C_3 Dimensões máximas da carga
- C_4 Distância entre o veículo e a carga
- C_5 Disposição da carga irregular
- C_6 Percurso do veículo automatizado predefinido
- C_7 Paragens do veículo com tempo limitado
- C_8 Tempo máximo para a transferência da carga
- C_9 Alcance do sistema de deteção do veículo automatizado
- C_{10} Incapacidade de comunicação entre veículo e novos sistemas
- C_{11} Espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução
- C_{12} Sentido do movimento do transportador de rolos existente

7.4. Primeiro Nível de Decomposição

7.4.1. Etapa 1 a 4 - Seleção dos Parâmetros de Projeto

O requisito funcional (RF_1) que se pretendia alcançar coma solução de projeto a definir era transferir cargas automaticamente de veículo autônomo para o transportador de rolos, para o qual seria desenvolvido um sistema de transferência de cargas automático, PP_1 . Para que fosse possível efetuar a transferência da carga com sucesso, o sistema de transferência teria que garantir que a carga se encontrava em condições de ser recolhida, a carga teria que ser pegada no local de recolha, movimentada, e

largada no local de entrega. O sistema teria que controlar todas estas operações, por forma a que ocorressem de forma automática assegurando a segurança humana durante o funcionamento do equipamento. Assim, enunciam-se os seguintes RFs como desdobramento de RF_1 e tendo em conta PP_1 :

- $RF_{1.1}$ Garantir que a carga se encontra em condições de ser recolhida;
- $RF_{1.2}$ Pegar e largar a carga;
- $RF_{1.3}$ Movimentar a carga;
- $RF_{1.4}$ Assegurar a segurança durante funcionamento do equipamento.

Para garantir que a carga se encontrava em condições de ser recolhida a solução considerada seria um sistema de validação na posição de recolha, $PP_{1.1}$, através de sensores, não tendo sido consideradas outras alternativas para $RF_{1.1}$. O fluxo seguido da primeira etapa da metodologia, foi o representado na Figura 7.2.

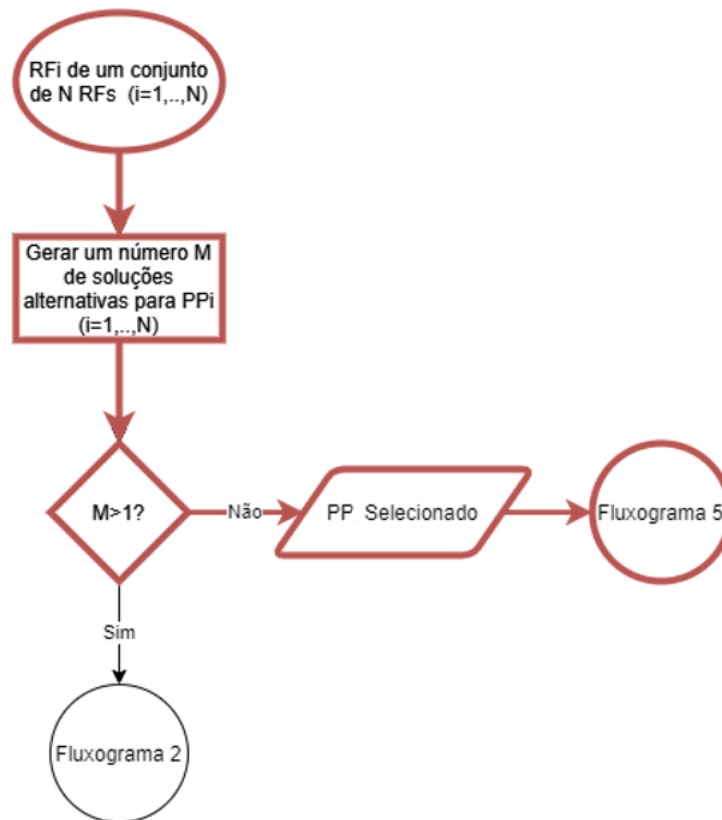


Figura 7.2- Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.1}$

Para pegar e largar as cargas, $RF_{1.2}$, dado à configuração geométrica das mesmas que apresentavam encaixes na sua base para movimentação, a solução passaria sempre por pegar as cargas nessa área. Foram geradas três soluções alternativas nesta fase, apresentadas na Figura 7.3, suportar a carga no sentido do comprimento, $PP_{1.2(1)}$, suportar a carga no sentido da largura, $PP_{1.2(2)}$, ou suportar a carga em ambos os sentidos, $PP_{1.2(3)}$.

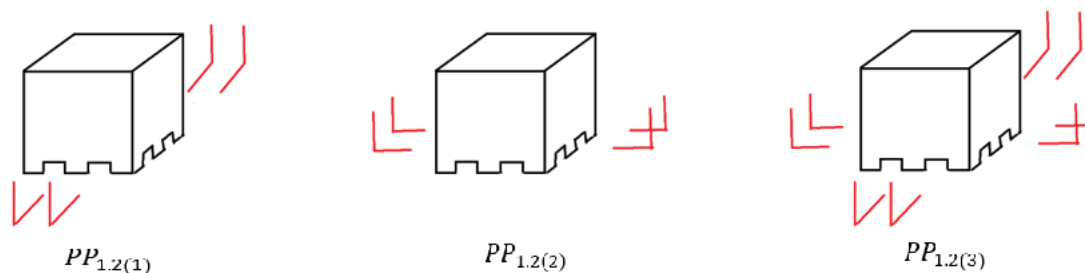


Figura 7.3 – Soluções alternativas para o $RF_{1,2}$

Seguindo a primeira etapa da metodologia, o fluxo seguido para a primeira etapa da metodologia foi o representado na Figura 7.4.

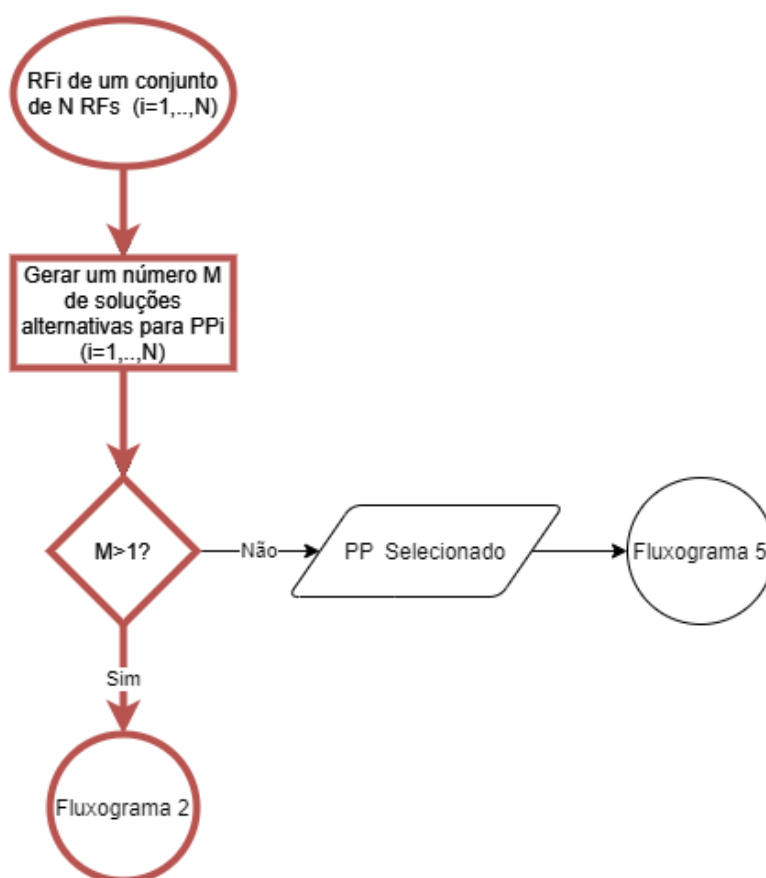


Figura 7.4 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1,2}$

Passando para a segunda etapa da metodologia, pretendia-se que fossem selecionadas entre as alternativas, as que não afetassem os restantes requisitos funcionais. Todas as alternativas afetariam o $RF_{1,3}$, uma vez que a ação de movimentação da carga, estaria dependente da ação de pegar e largar a carga, não existindo nenhuma alternativa que alterasse esta dependência. O fluxo seguido, nesta segunda etapa da metodologia, foi então o representado na Figura 7.5.

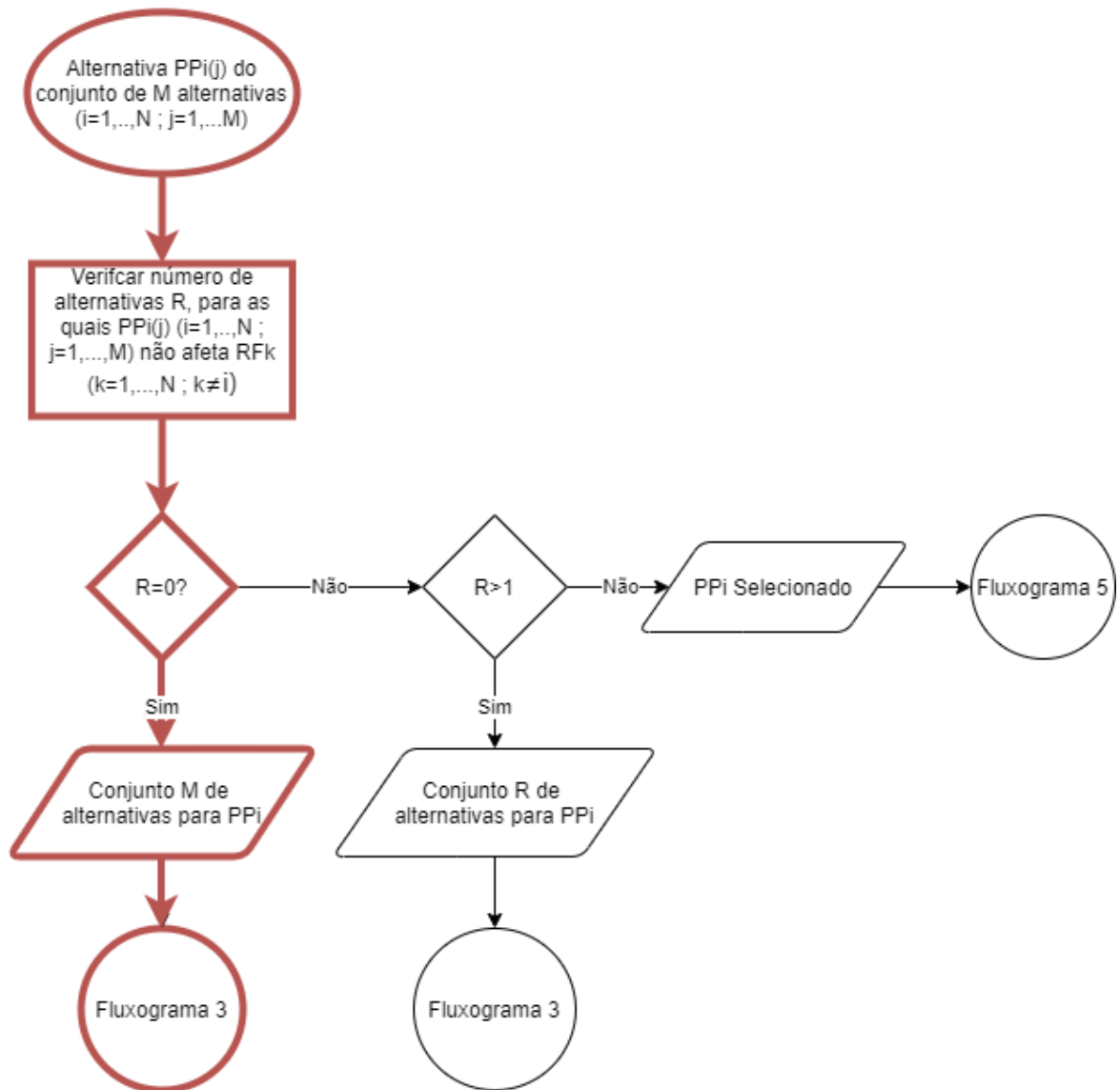


Figura 7.5 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1,2}$

Permaneceu, deste modo, o conjunto M de alternativas, passando-se para a terceira etapa da metodologia definida pelo Fluxograma 3, avaliando se existiam alternativas que contemplassem soluções com componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas. Não foram encontradas, dentro do conjunto M , soluções que garantissem esta condição, como se pode verificar pelo fluxo seguido nesta etapa, representado na Figura 7.6.

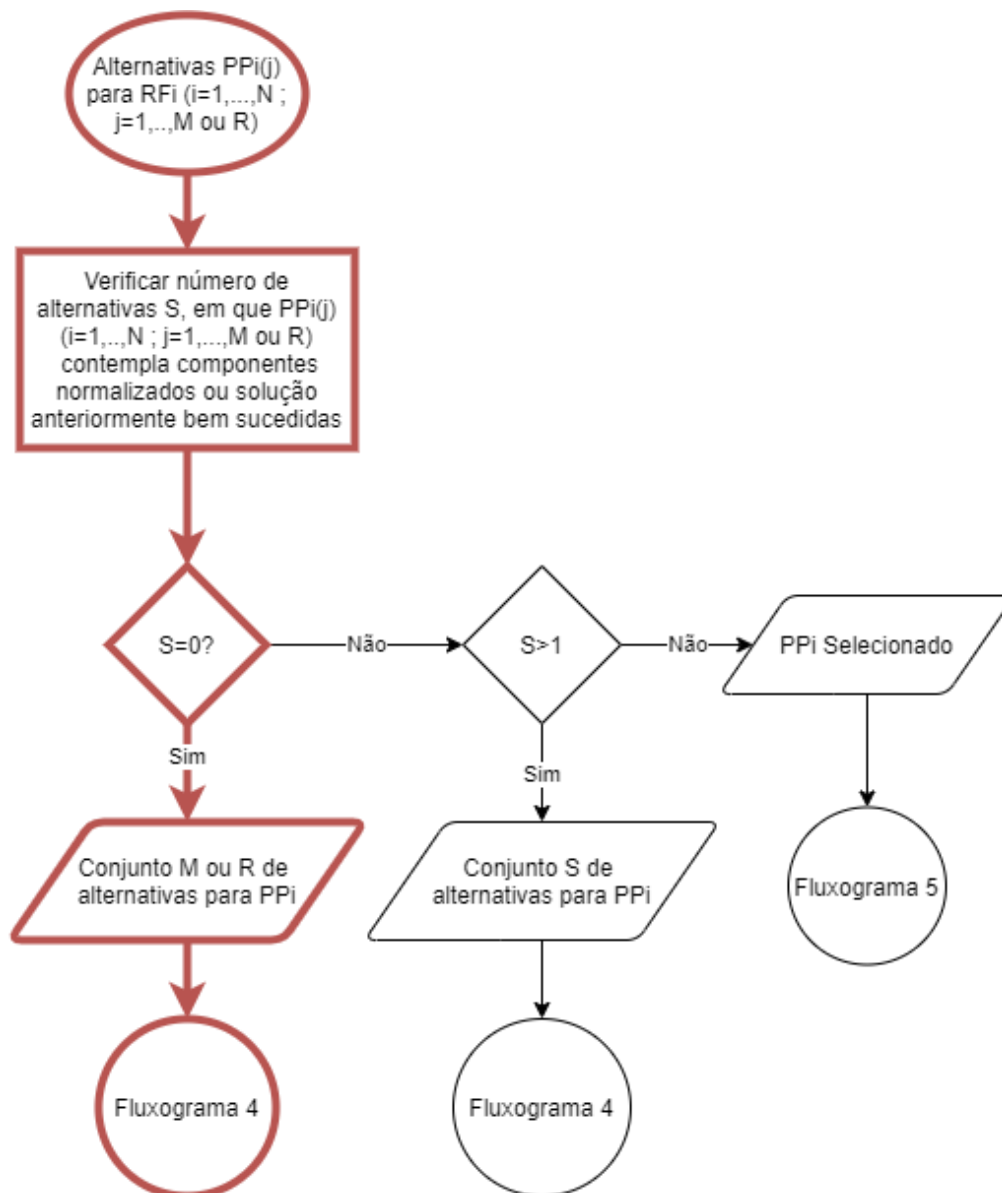


Figura 7.6- Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1,2}$

Passou-se então para a quarta etapa da metodologia, correspondente à avaliação do grau de conflito das soluções alternativas do conjunto M , com os constrangimentos existentes, apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Análise das soluções alternativas para $RF_{1.2}$ face aos constrangimentos existentes

$RF_{1.2}$	Soluções alternativas		
Pegar e Largar a Carga	$PP_{1.2(1)}$	$PP_{1.2(2)}$	$PP_{1.2(3)}$
	Sistema com pinças laterais no sentido do comprimento	Sistema com pinças laterais no sentido da largura	Sistema com pinças nas quatro laterais
Constrangimentos	Grau de conflito		
C_1 Peso máximo da carga	1	1	1
C_2 Configuração geométrica da carga (encaixes na base)	1	1	1
C_3 Dimensões máximas da carga	1	1	1
C_4 Distância máxima entre o veículo e a carga	2	1	2
C_5 Disposição da carga irregular	1	1	2
C_8 Tempo de ciclo máximo	1	2	2
C_{11} Espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução	1	2	3
C_{12} Posição do transportador de rolos	1	1	1
Σ	9	10	13

Como se pode verificar pela Tabela 7.1, o grau de conflito das soluções alternativas varia nos constrangimentos C_4 , C_5 , C_8 , C_{11} e C_{12} . No caso de C_4 , a distância máxima entre a carga e o veículo seria um constrangimento que apresentaria maiores dificuldades ao desenvolvimento das soluções $PP_{1.2(1)}$ e $PP_{1.2(3)}$, porque ambas consideravam pegar a carga no sentido do comprimento. Para C_5 , a disposição irregular da carga apresentava maior conflito para a solução $PP_{1.2(3)}$, uma vez que esta sugere pegar a carga pelas quatro laterais. As restantes duas apenas consideram pegar a carga por duas laterais, sendo que só necessita de ser considerada a irregularidade da disposição da carga no sentido do comprimento ou da largura. Quanto ao constrangimento C_8 previa-se que a solução $PP_{1.2(1)}$, apresentasse menor grau de conflito com o tempo de ciclo que se pretende alcançar, uma vez que ao pegar no sentido do comprimento da carga, quando a mesma fosse depositada sobre o tapete de rolos existente, poderia ser imediatamente movimentada, enquanto que nas outras duas soluções alternativas, previam-se pinças no sentido da largura, o que obrigaria que, após largar a carga, as mesmas fossem descolocadas para possibilitar o movimento da carga no transportador de rolos, aumentando o tempo de ciclo do sistema. Relativamente ao espaço disponível nas instalações do cliente, C_{11} , a solução $PP_{1.2(2)}$ apesar de aparentemente poder ser a solução mais compacta por se estar a pegar no sentido da menor largura da carga, devido à necessidade de as pinças terem que ser deslocadas após a carga ser depositada, poderia

apresentar um acréscimo na dimensão da solução final aumentando o conflito com este constrangimento. A contrário, a solução $PP_{1.2(1)}$ seria menos compacta por se estar a pegar no sentido do comprimento, mas previa-se menos impacto sobre as dimensões finais do sistema. A solução $PP_{1.2(3)}$ seria a que previa um maior grau de conflito com os constrangimentos, uma vez que considerava pegar a carga em ambos os sentidos.

O somatório dos graus de conflito com os constrangimentos tinha um valor inferior para a solução $PP_{1.2(1)}$. O Sistema com pinças laterais no sentido do comprimento, esta foi a solução selecionada.

Na Figura 7.7 está representado o fluxo seguido na quarta etapa da metodologia para a seleção do parâmetro de projeto.

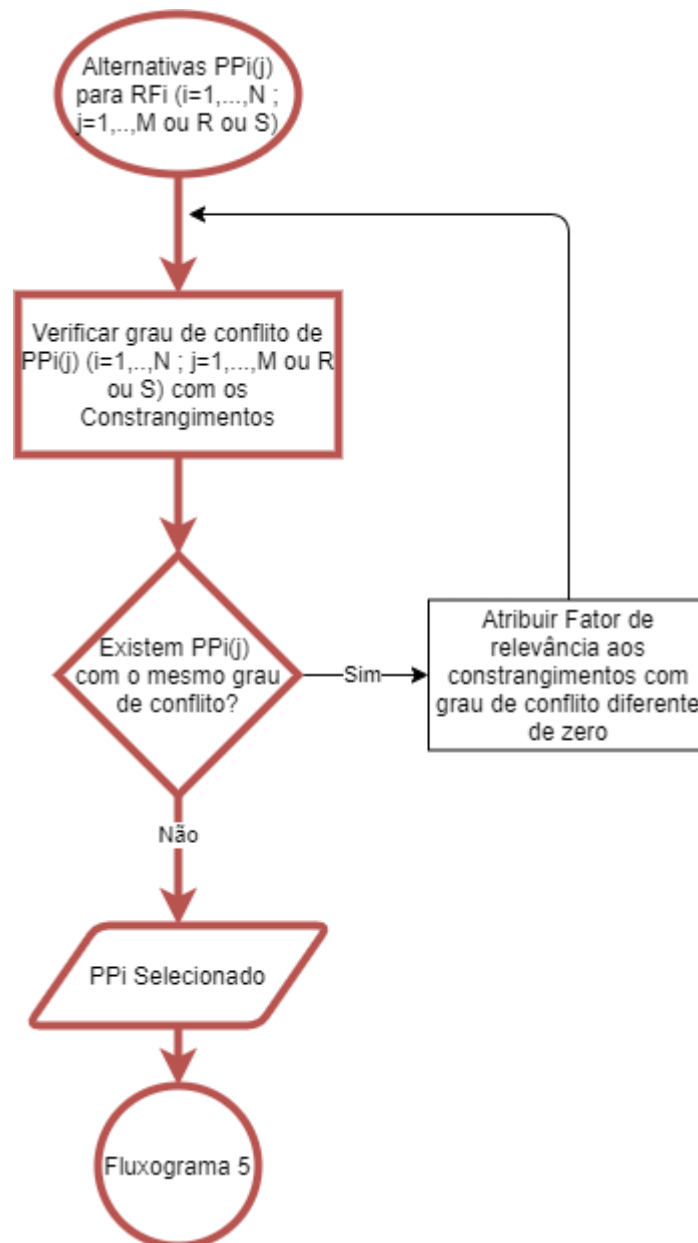


Figura 7.7 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.2}$

Para movimentar a carga. $RF_{1,3}$, a solução escolhida foi um pórtico para movimentação da carga suspensa, $PP_{1,3}$, como esquematizado na Figura 7.8. Face às características do problema não foram geradas soluções alternativas para este requisito

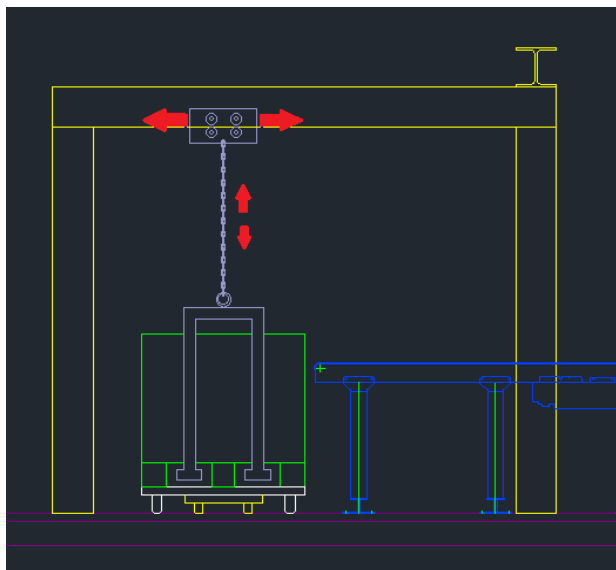


Figura 7.8 – Representação esquemática do pórtico para movimentação de carga suspensa $PP_{1,3}$

A primeira etapa da metodologia para a seleção de $PP_{1,3}$, seguiu o fluxo representado na Figura 7.9.

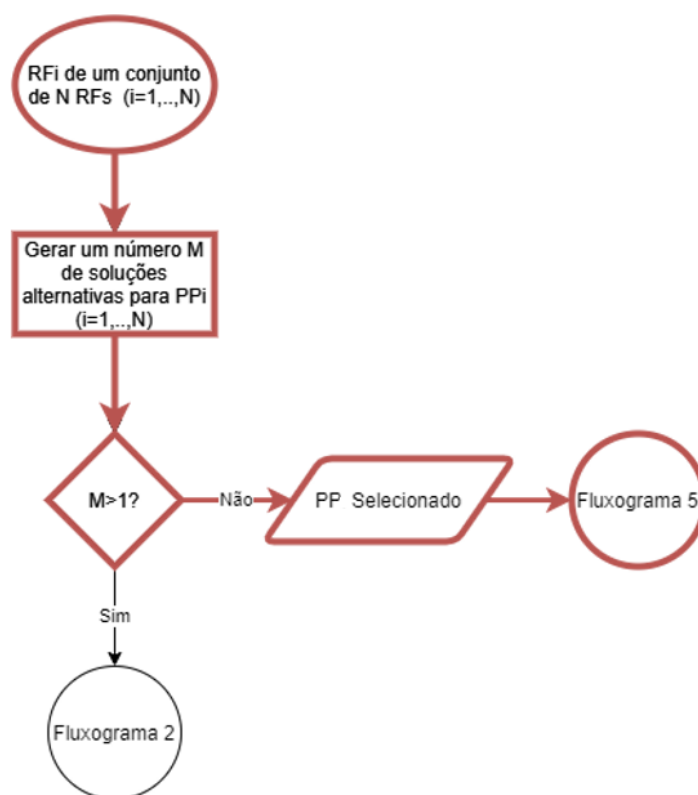


Figura 7.9 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1,3}$

Para assegurar a segurança durante o funcionamento do equipamento, $RF_{1,4}$, tendo em conta que teria que ser permitido o movimento das cargas para o interior do sistema de modo a poderem ser recolhidas, foram consideradas duas alternativas, ilustradas na Figura 7.10. Uma consistia em guardas mecânicas com uma porta mecânica do tipo guilhotina na entrada e na saída do equipamento, $PP_{1,4(1)}$, e a outra solução consistia igualmente em guardas mecânicas mas com um sistema de cortinas óticas também à entrada e à saída, $PP_{1,4(2)}$, para parar o equipamento em caso de interrupção.

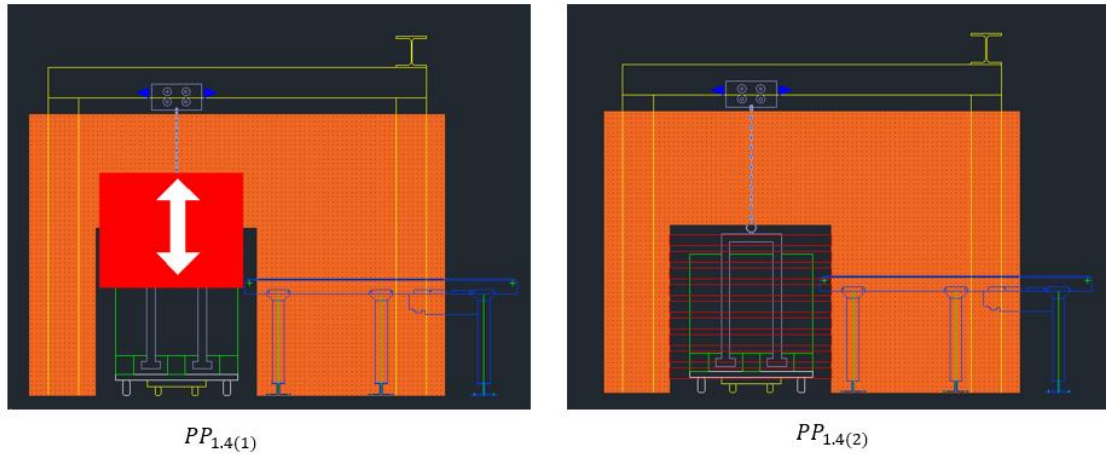


Figura 7.10-Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1,4}$

O fluxo da primeira etapa da metodologia seguido, foi então o representado na Figura 7.11.

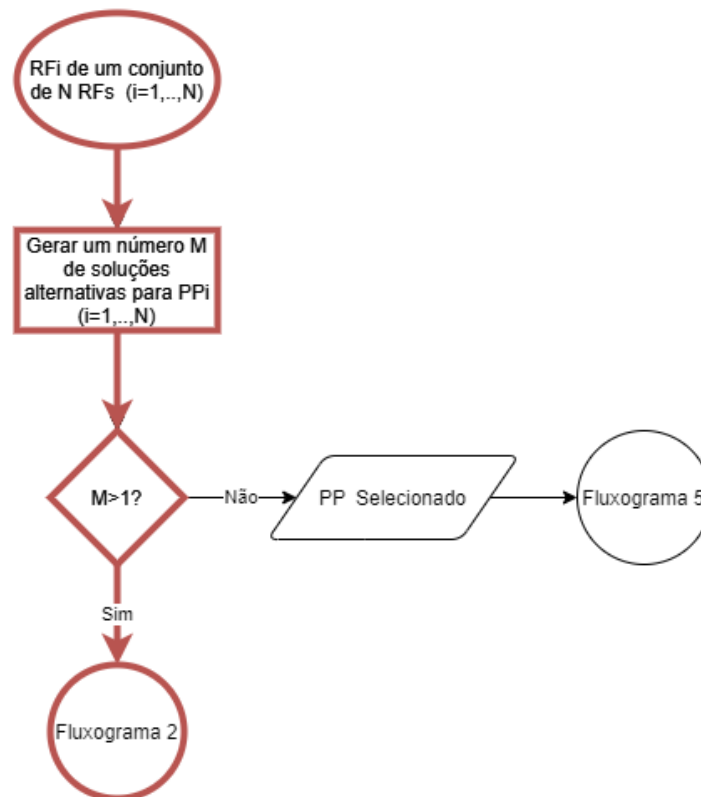


Figura 7.11 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1,4}$

Passando para a segunda etapa de seleção, ambas as alternativas afetavam os restantes requisitos funcionais, uma vez que era pretendido garantir o funcionamento em segurança do sistema, este parâmetro de projeto teria que ter influência sobre as restantes funcionalidades do sistema, sendo o caminho percorrido na segunda etapa o demonstrado na Figura 7.12.

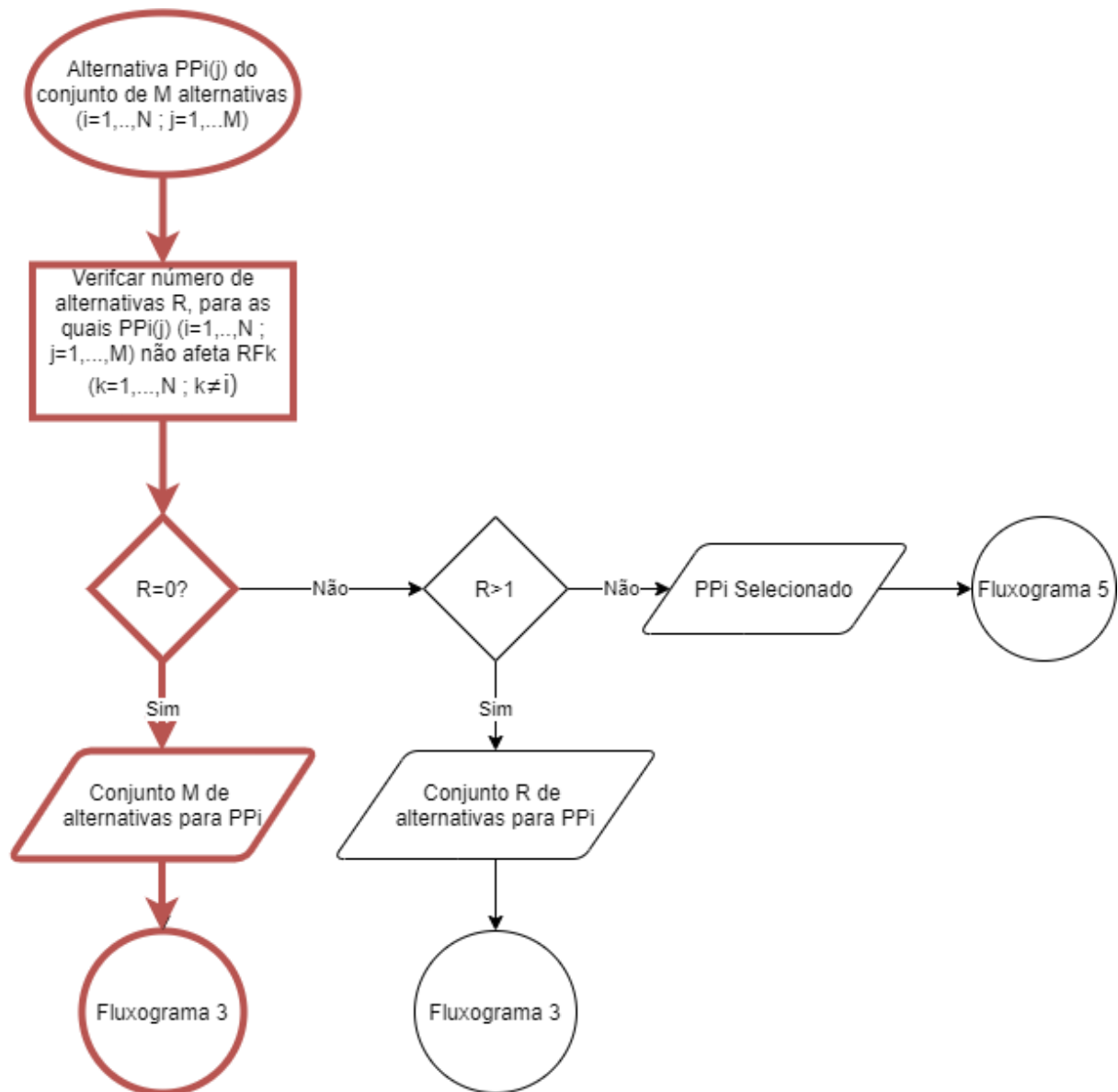


Figura 7.12 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1,4}$

Avançando para a terceira etapa de seleção, foi selecionado o $PP_{1,4(2)}$, uma vez que este contemplava a utilização de cortinas óticas, solução esta existente no mercado para o respetivo efeito. O fluxo seguido nesta etapa foi então o representado na Figura 7.13.

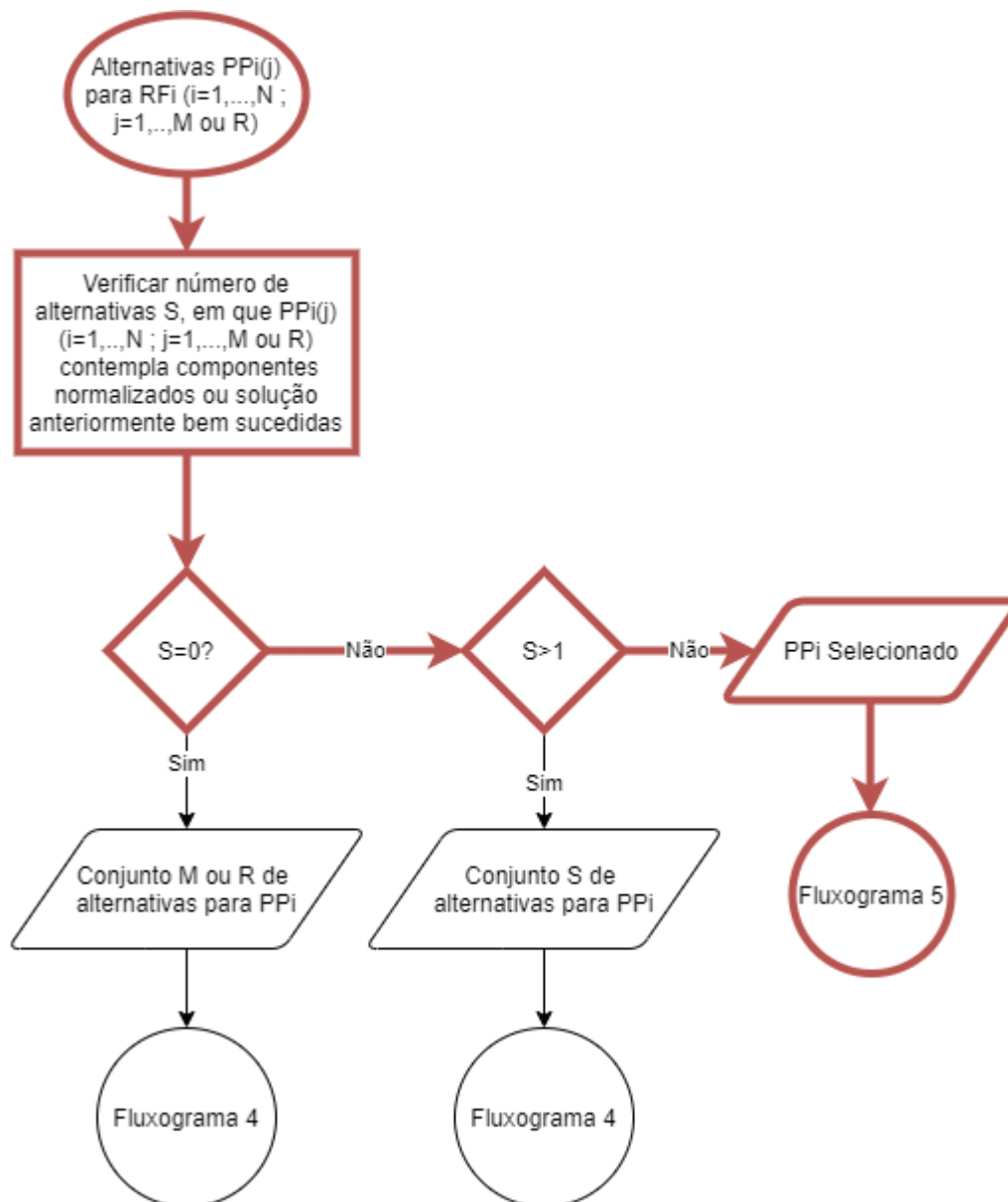


Figura 7.13 - Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1,4}$

7.4.2. Etapa 5 - Verificação dos constrangimentos entre PPs

Tendo nesta fase todos os parâmetros de projeto selecionados para os requisitos funcionais estabelecidos, poder-se-á passar à quinta etapa da metodologia. Na Figura 7.14 e na Figura 7.15 estão representadas as decomposições dos RFs e dos PPs , respetivamente, do projeto.

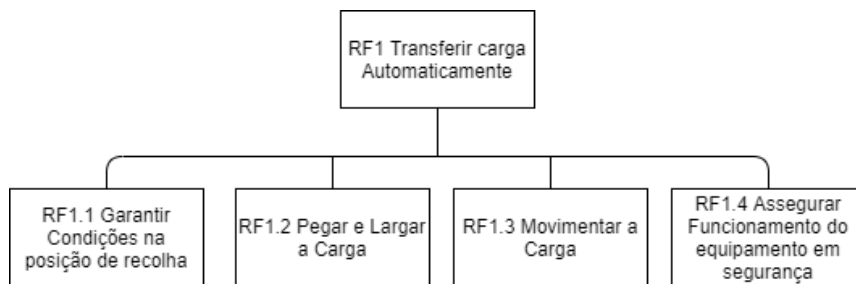


Figura 7.14 – Primeiro Nível de Decomposição dos Requisitos Funcionais

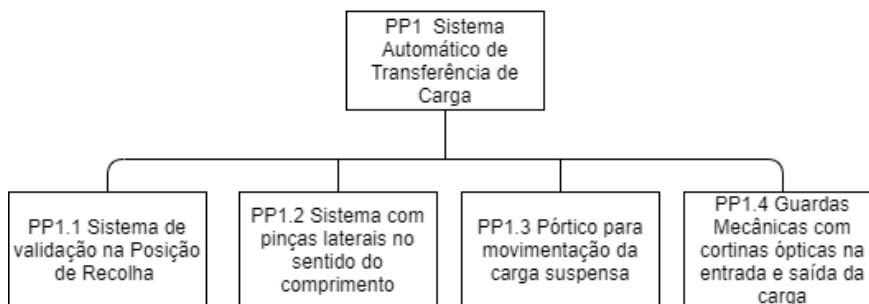


Figura 7.15 – Primeiro Nível de Decomposição dos Parâmetros de Projeto

Para validar, finalmente, o conjunto de *PPs* selecionados foi então feita a matriz de constrangimentos apresentada na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Matriz de constrangimentos entre *PPs* do primeiro nível de decomposição

	$PP_{1.1}$	$PP_{1.2}$	$PP_{1.3}$	$PP_{1.4}$
$PP_{1.1}$	-	0	0	0
$PP_{1.2}$	0	-	C	C
$PP_{1.3}$	0	C	-	C
$PP_{1.4}$	0	C	C	-

Da análise da matriz de constrangimentos, representada na Figura 7.16, verificou-se que existiam elementos não diagonais diferentes de zero, ficando-se então com um conjunto *C* de *PPs*, composto por $PP_{1.2}$, $PP_{1.3}$ e $PP_{1.4}$, que seriam revistos pelo processo descrito pelo Fluxograma 5.1.

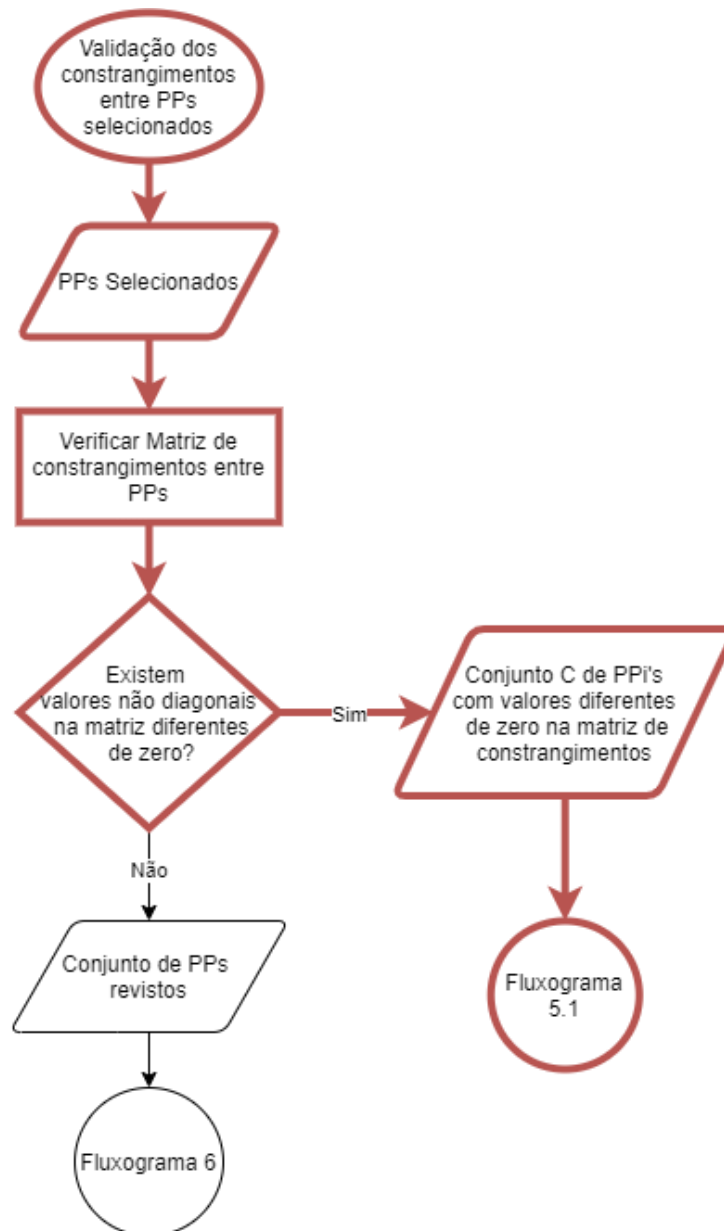


Figura 7.16 – Fluxograma 5 para o primeiro nível de decomposição

Passando então para a análise deste conjunto C de PPs , verificou-se que para $PP_{1,2}$, as soluções alternativas não apresentavam melhorias face aos constrangimentos existentes, sendo o fluxo percorrido no fluxograma desta etapa, o representado na Figura 7.17. Para $PP_{1,3}$ também não existiam soluções alternativas, portanto o fluxo seguido foi o mesmo que o apresentado para $PP_{1,2}$ e para $PP_{1,4}$, tendo a solução origem de um conjunto S e não existindo mais alternativas nesse conjunto, o fluxo percorrido foi o representado na Figura 7.18.

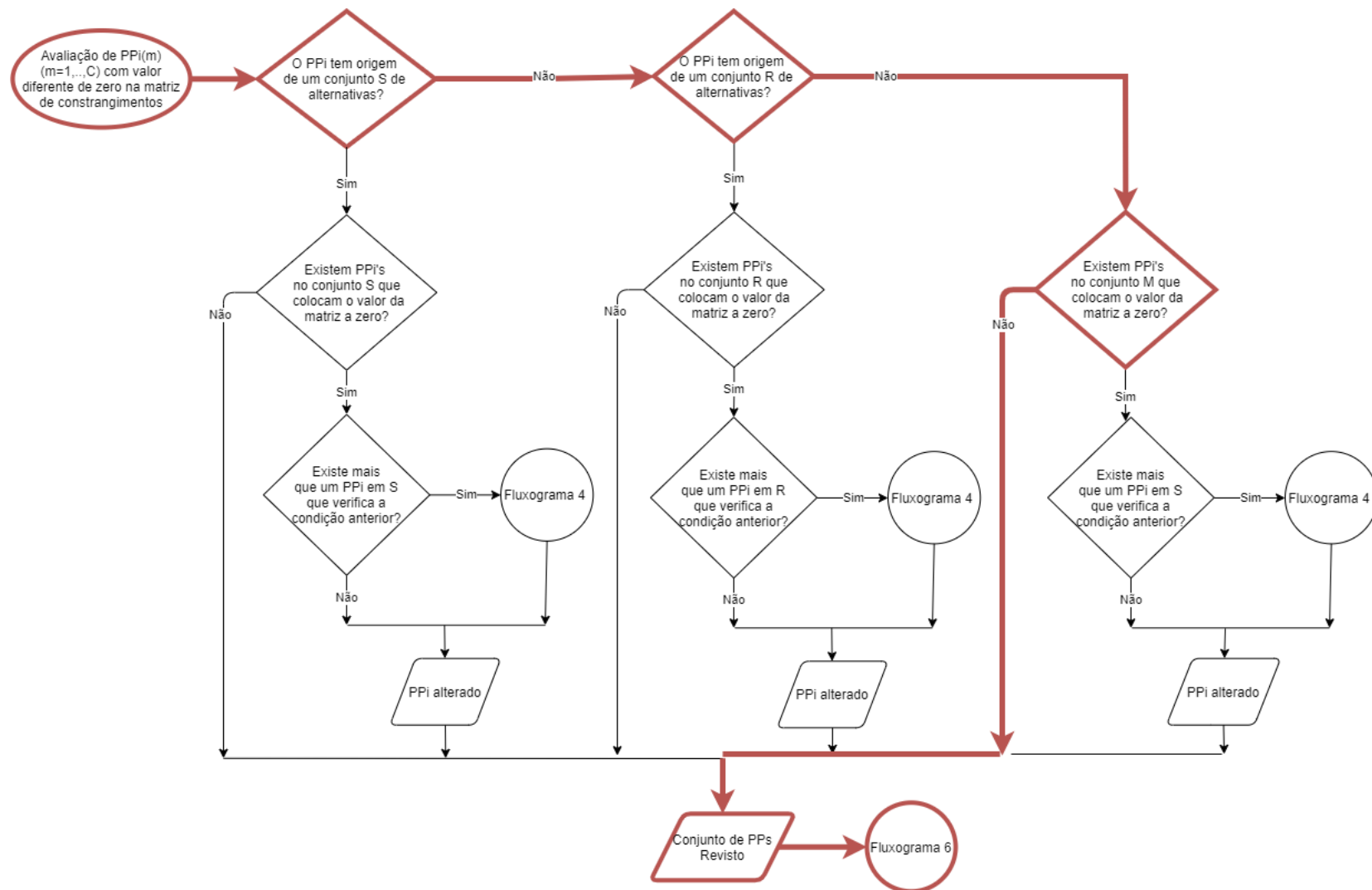


Figura 7.17 – Fluxograma 5.1 para $PP_{1.2}$ $PP_{1.3}$

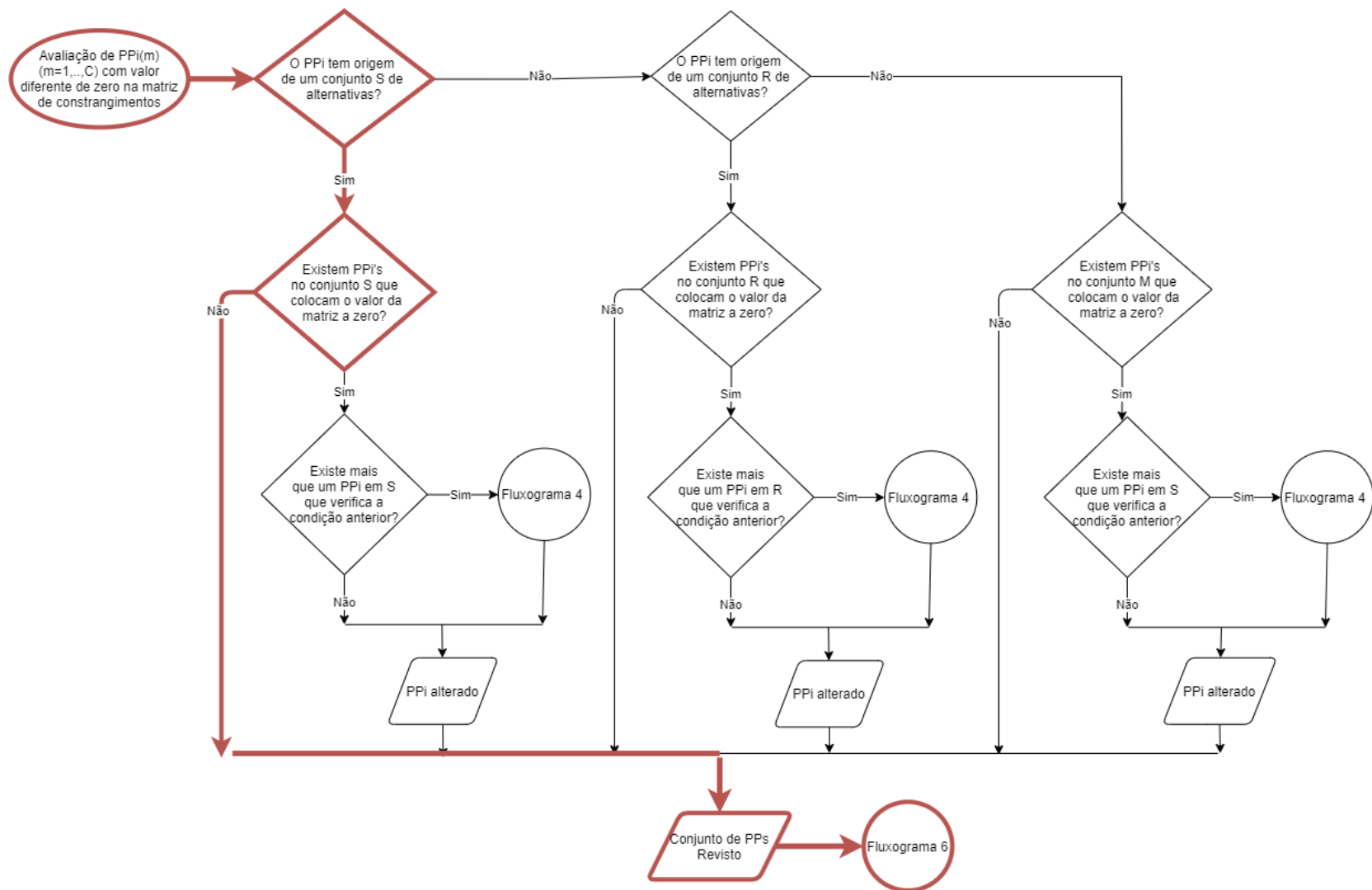


Figura 7.18 - Fluxograma 5.1 para $PP_{1.4}$

7.4.3. Etapa 6 - Validação pelo 1º Axioma da TAP

Na etapa 6 procede-se à validação do conjunto de soluções definidas perante o primeiro axioma da TAP. A equação de projeto de projeto pode ser descrita por:

$$\begin{pmatrix} RF_{1.1} \\ RF_{1.2} \\ RF_{1.3} \\ RF_{1.4} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X \\ X & X & X & X \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} PP_{1.1} \\ PP_{1.2} \\ PP_{1.3} \\ PP_{1.4} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

Como se pode verificar pela matriz de projeto, trata-se de um projeto acoplado. Os elementos não diagonais devem-se às funcionalidades do sistema que, sendo um sistema automático, as mesmas estão dependentes umas das outras. O requisito $RF_{1.2}$, para pegar e largar a carga, é preciso que o sistema seja movimentado até à posição de recolha e de colocação da mesma, ou seja está dependente $RF_{1.3}$, e vice-versa. Quer a recolha da carga $RF_{1.2}$, quer o movimento da carga $RF_{1.3}$, estão dependentes das condições de recolha da carga, $RF_{1.1}$, e do sistema que assegura o funcionamento do equipamento em segurança $RF_{1.4}$, uma vez que no caso das cortinas óticas de segurança serem ativadas os movimentos do sistema não devem ocorrer.

Assim sendo, desta fase de validação pelo 1º axioma da TAP, o percurso seria o representado na Figura 7.19, do qual resultaria um conjunto T de PP s composto por $PP_{1.2}$, $PP_{1.3}$, que seriam revistos pelo processo descrito pelo Fluxograma 6.1

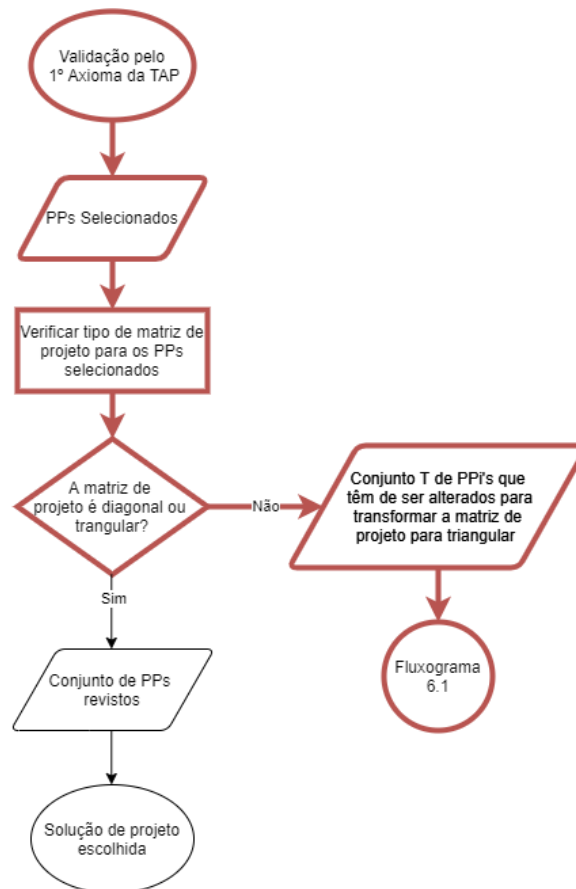


Figura 7.19 – Fluxograma 6 para o primeiro nível de decomposição

Tanto para $PP_{1.2}$ como para $PP_{1.3}$ foram revistos de modo a verificar se existiam alternativas que alterariam a matriz de projeto para triangular, o caminho percorrido pelo Fluxograma 6.1 seria idêntico para ambos, e seria o representado na Figura 7.19.

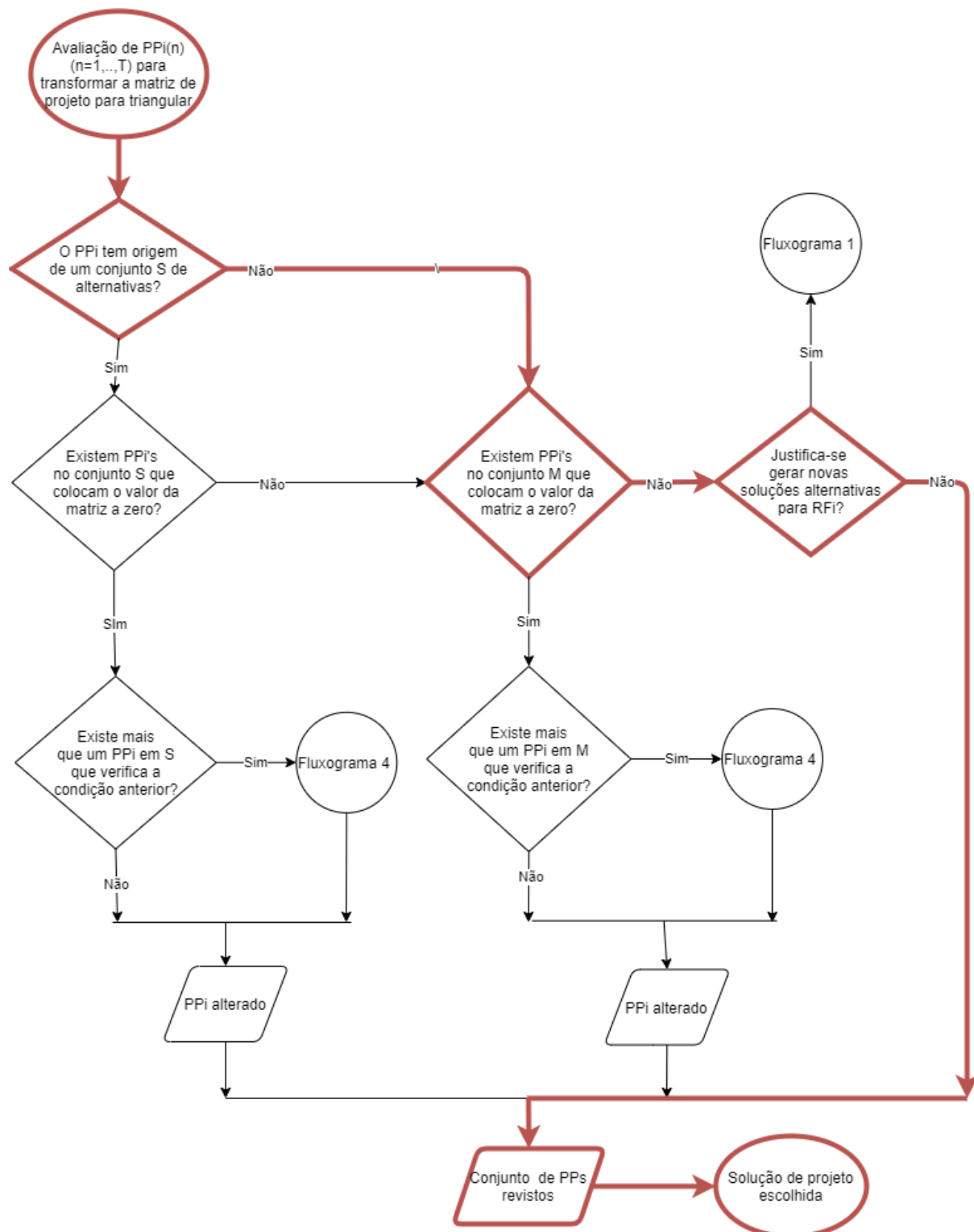


Figura 7.20 – Fluxograma 6.1 para $PP_{1.2}$ e $PP_{1.3}$.

Não foram encontrados *PPs* nas alternativas geradas que alterassem a matriz de projeto para uma configuração triangular. Considerou-se que a hipótese de gerar novas alternativas não se justificaria, uma vez que dificilmente se encontraria uma solução que transformasse os respectivos valores da matriz de projeto a zero, mantendo-se assim os *PPs* selecionados.

7.5. Segundo Nível de Decomposição

7.5.1. Etapa 1 a 4 - Seleção dos Parâmetros de Projeto

Para o sistema de validação na posição de recolha, $PP_{1.1}$, seria necessário que tivesse a capacidade de manter a carga na posição de recolha e depois garantir que a mesma estava em condições de ser recolhida, ou seja, os requisitos funcionais seriam:

- $RF_{1.1.1}$ Manter carga na posição de recolha;
- $RF_{1.1.2}$ Garantir condições de recolha.

Dada a característica do veículo autónomo ter um sistema de deteção de obstáculos, era claro que a maneira mais óbvia de satisfazer o requisito $RF_{1.1.1}$, manter a carga na posição de recolha, seria um sistema para colocar obstáculo na sua zona de deteção, $PP_{1.1.1}$. Para este requisito não foram consideradas outras alternativas dada a característica do veículo, estando representado na Figura 7.21 o caminho seguido na primeira etapa da metodologia.

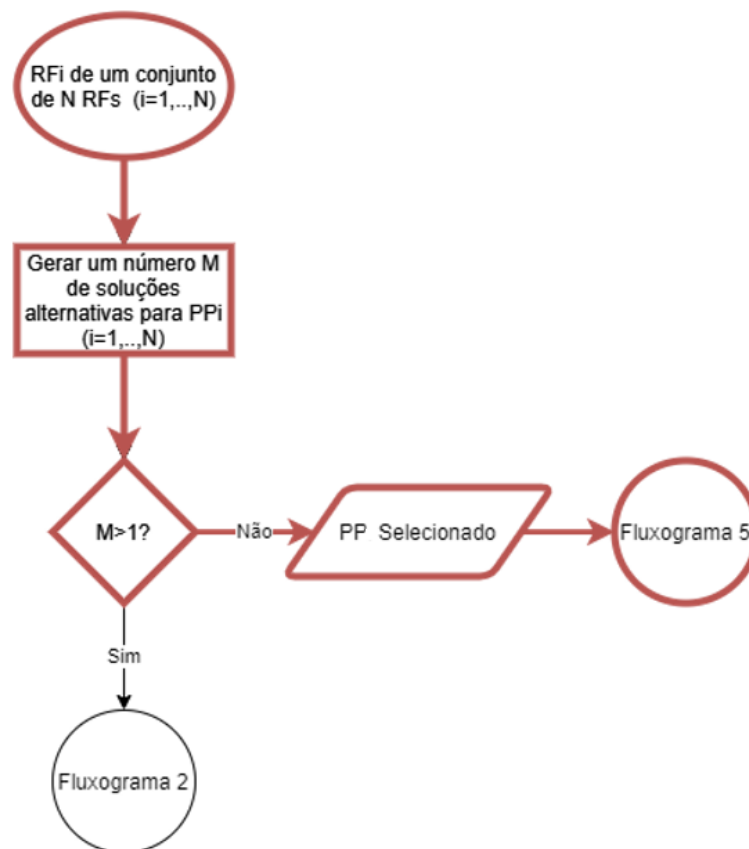


Figura 7.21 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.1.1}$

Para garantir que a carga está em condições de ser recolhida, $RF_{1.1.2}$, foram consideradas duas alternativas esquematizadas na Figura 7.22, um sistema de verificação do comprimento através fotocélulas montadas nas pinças, $PP_{1.1.2(1)}$, e a verificação do comprimento da carga através de cortinas óticas, $PP_{1.1.2(2)}$.

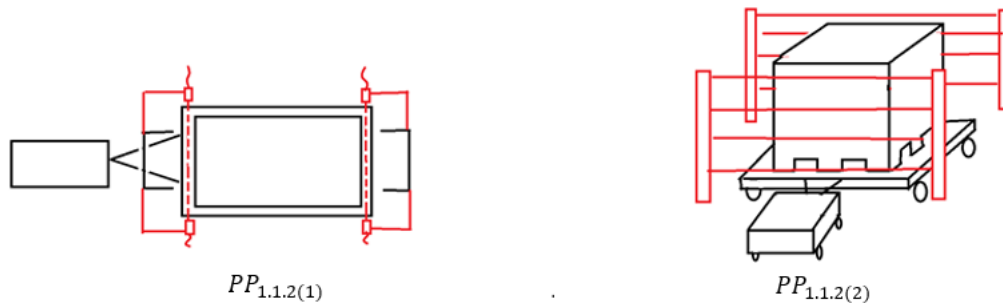


Figura 7.22 - Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.1.2}$

O fluxo percorrido na primeira etapa da metodologia para a seleção deste parâmetro de projeto foi o representado na Figura 7.23.

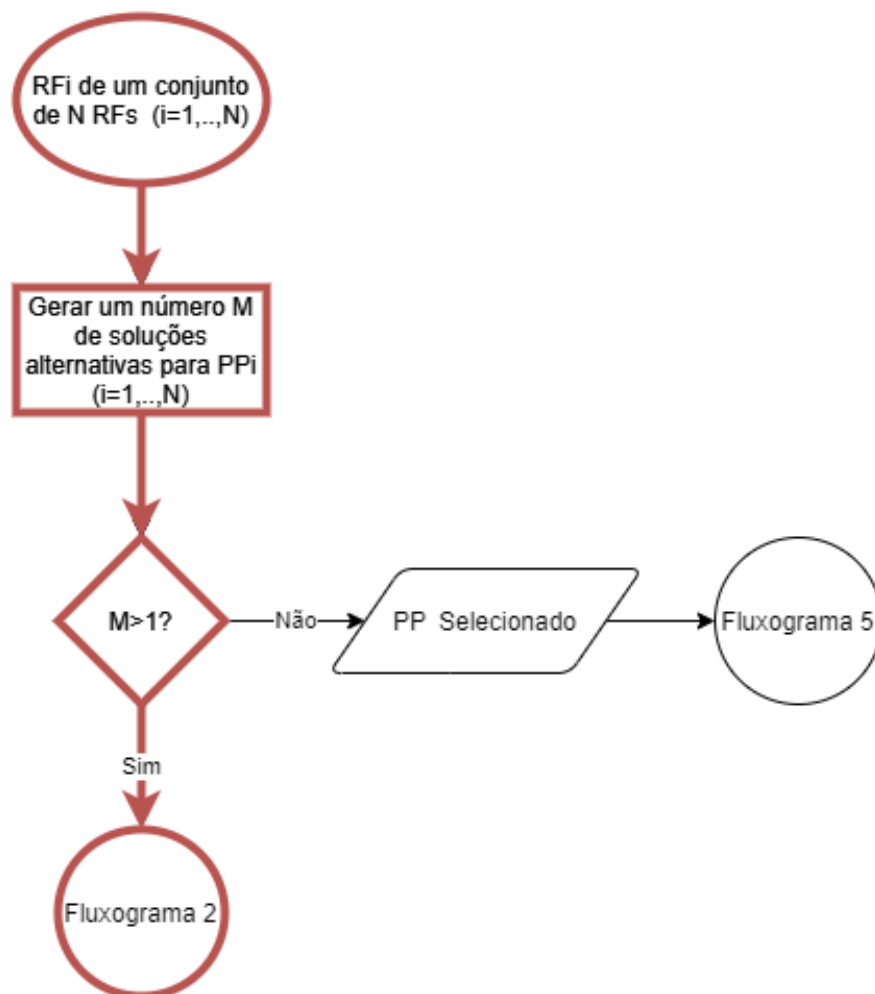


Figura 7.23 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.1.2}$

Passou-se então para a segunda etapa de seleção. Verificou-se que ambas as soluções alternativas não afetariam o requisito funcional $RF_{1.1.2}$, como se pode verificar pelo fluxo seguido, representado na Figura 7.24.

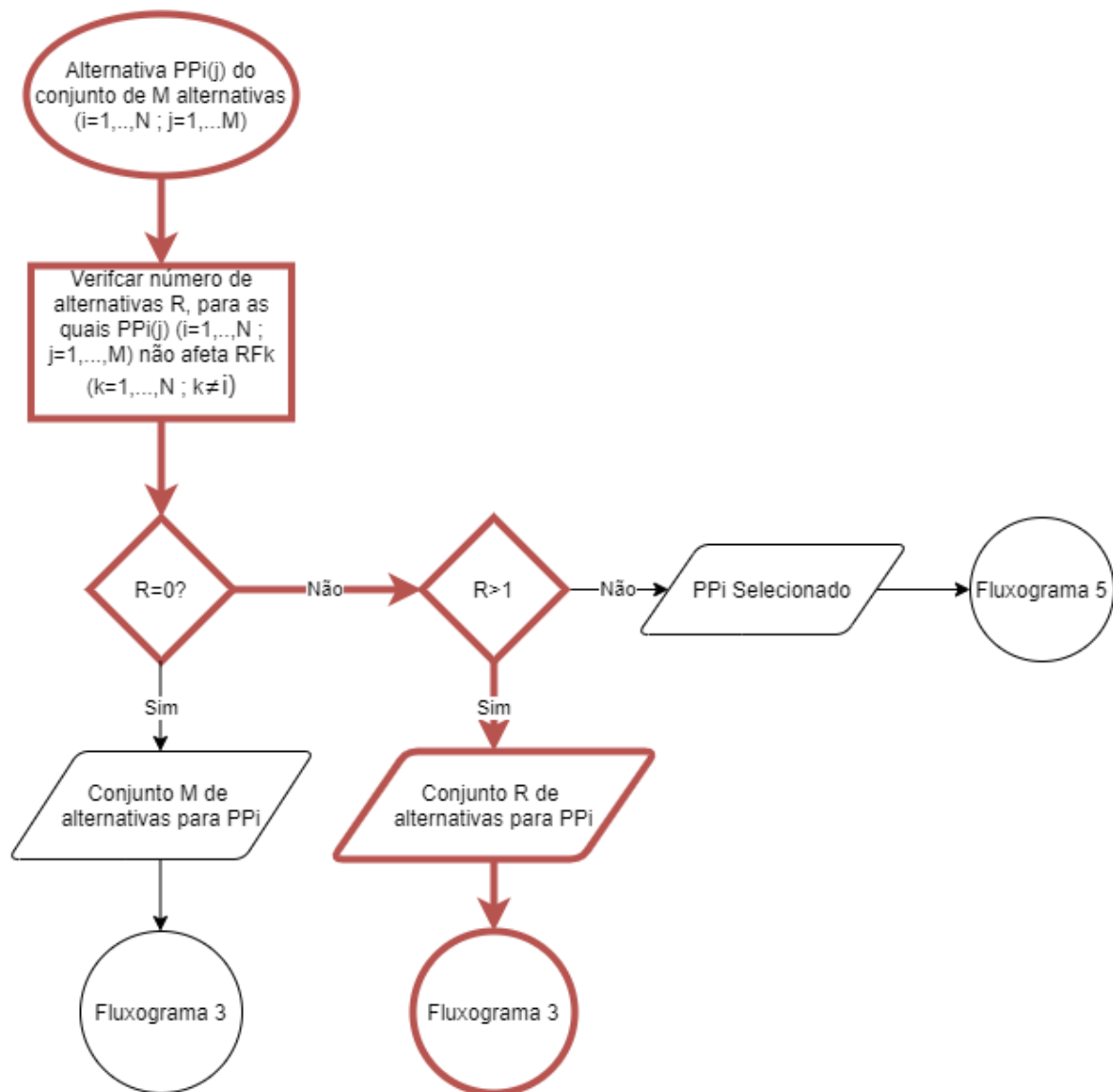


Figura 7.24 – Fluxograma 2, para a seleção de $PP_{1.1.2}$

Passando assim a ter um conjunto R de soluções alternativas passou-se para a terceira etapa de seleção definida pelo Fluxograma 3, em que o caminho percorrido está representado na Figura 7.25.

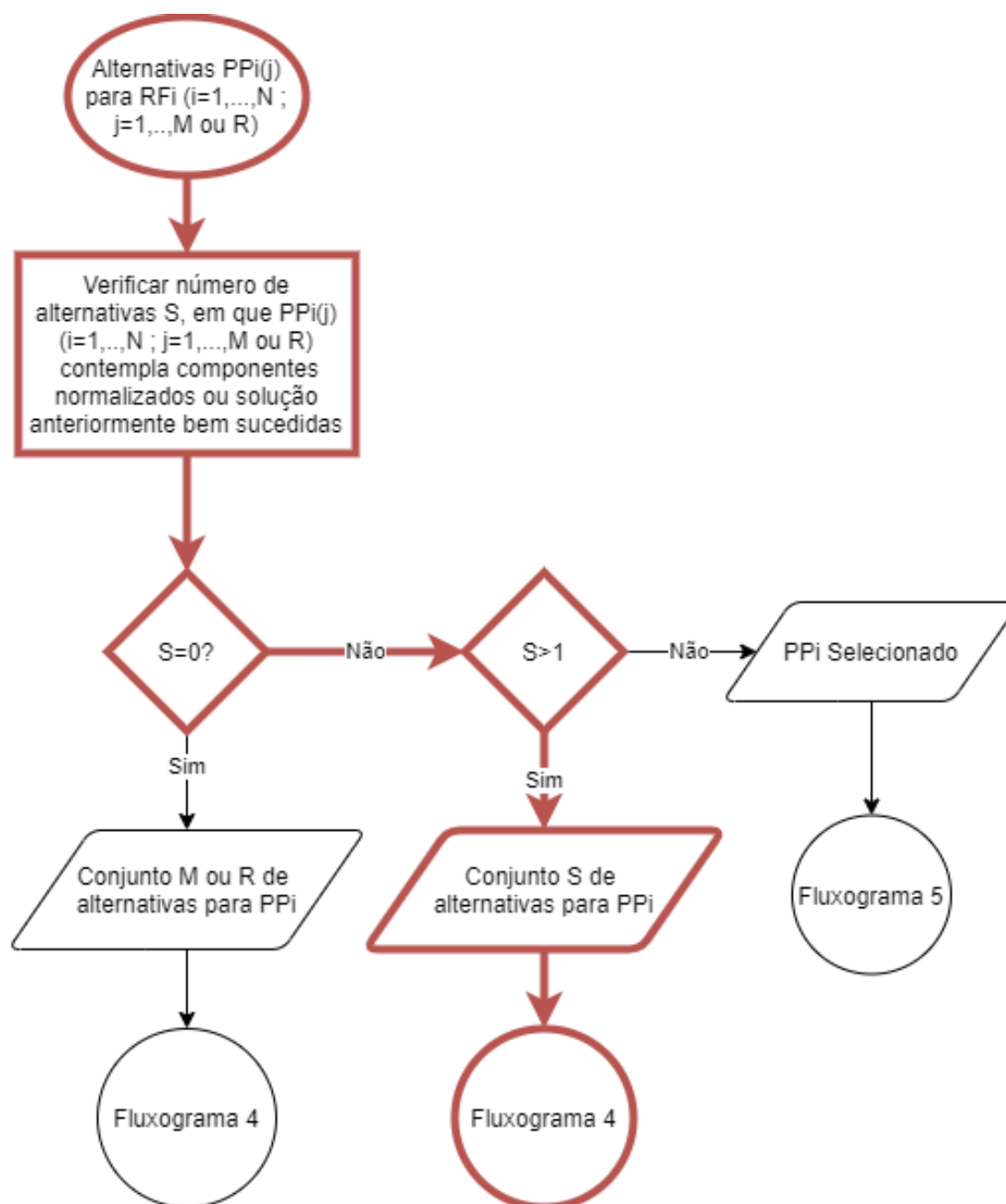


Figura 7.25 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.1.2}$

Ambas as soluções contemplavam a utilização de componentes normalizados, ficando assim com um conjunto S de soluções, que seriam agora selecionadas através da quarta etapa da metodologia, avaliando o grau de conflito dessas alternativas com os constrangimentos e com os PPs do nível hierárquico superior apresentado na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Análise das soluções alternativas para $RF_{1.1.2}$ face aos constrangimentos existentes

$RF_{1.1.2}$	Soluções alternativas	
Garantir condições de recolha	$PP_{1.1.2(1)}$	$PP_{1.1.1(2)}$
	Sistema de verificação do comprimento através foto-células montadas nas pinças	Verificação por do comprimento da carga através de cortinas óticas
Constrangimentos	Grau de conflito	
C_3 Dimensões Máximas da Carga	1	2
C_5 Disposição da Carga Irregular	2	1
C_8 Tempo de ciclo máximo	1	0
$PP_{1.2}$ Sistema com pinças laterais no sentido do comprimento	1	0
Σ	5	3

A solução escolhida foi a das barreiras óticas fixas, $PP_{1.1.2B}$, por ser a que apresentava um menor grau de conflito com os constrangimentos e PPs anteriormente definidas, em que o percurso nesta etapa da metodologia está representado na Figura 7.26.

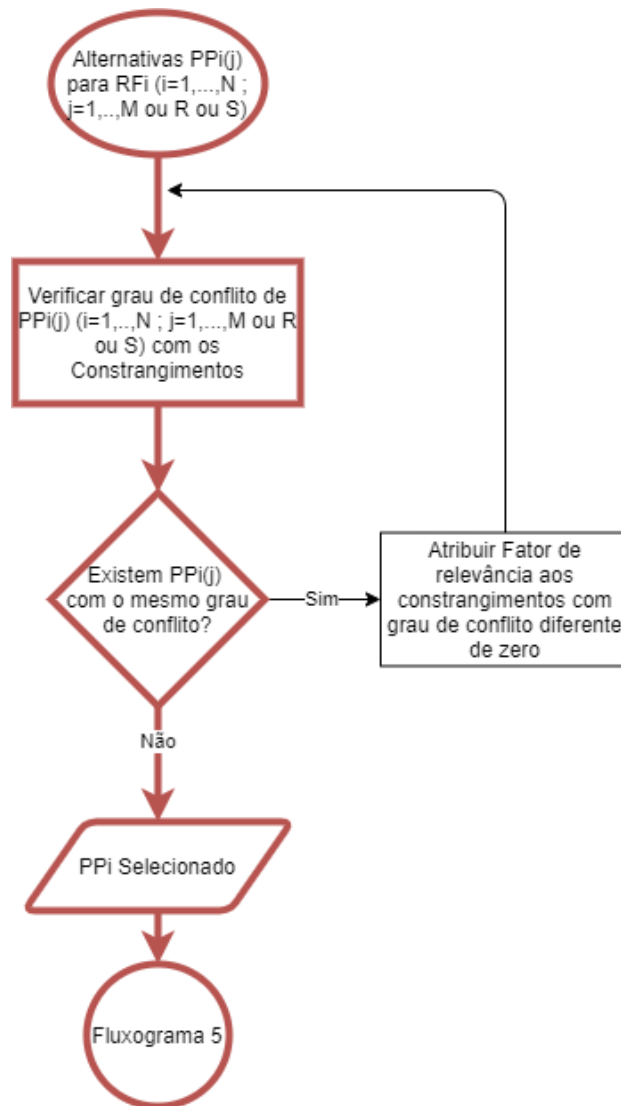


Figura 7.26 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.1.2}$

Passando para a solução que tinha como objetivo satisfazer o requisito funcional de pegar e largar a carga, $RF_{1.2}$, para o qual foi estabelecida como solução um sistema de pinças laterais no sentido do comprimento, $PP_{1.2}$, seria necessário movimentar as pinças para garantir a recolha e a libertação da carga. O requisito funcional para a solução $PP_{1.2}$ seria então o seguinte:

- $RF_{1.2.1}$ Inserir e retirar as pinças da carga.

Foram consideradas três alternativas ilustradas na Figura 7.27, pinças com movimento linear no topo, $PP_{1.2.1(1)}$, pinças com movimento rotativo, $PP_{1.2.1(2)}$, e pinças com movimento linear na extremidade $PP_{1.2.1(3)}$.

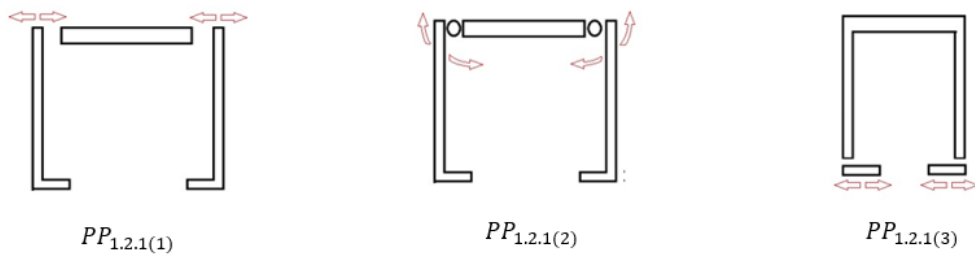


Figura 7.27 Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.2.1}$

Portanto, o fluxo da 1ª etapa da metodologia para este Requisito Funcional é o que se encontra representado na Figura 7.28.

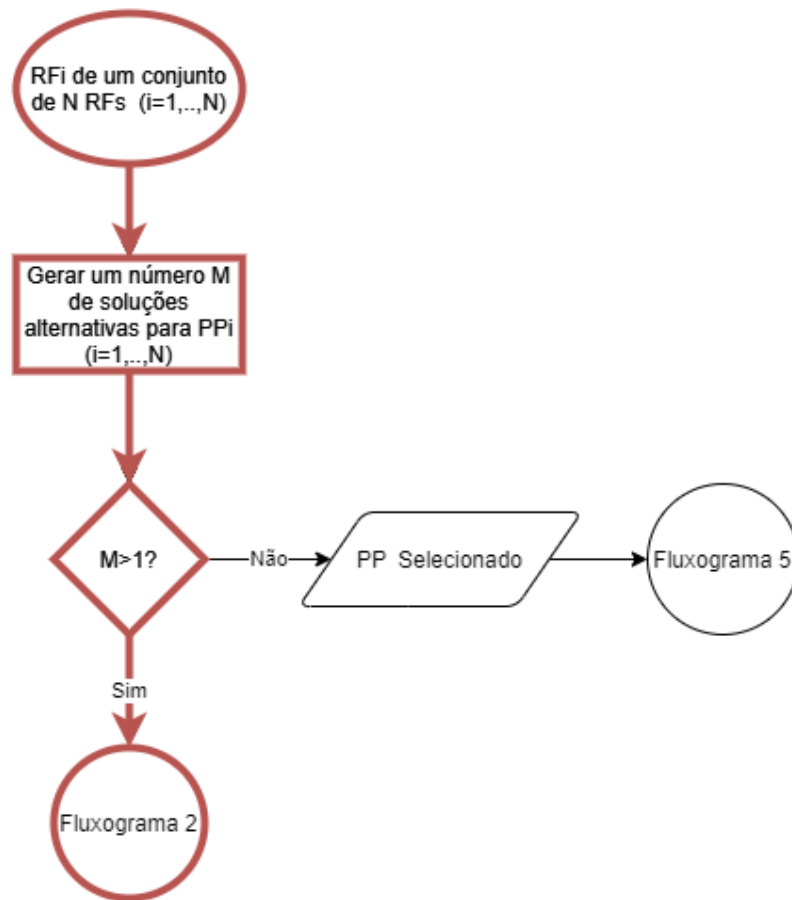


Figura 7.28 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.2.1}$

Não existindo outro requisito funcional na decomposição de $PP_{1.2}$, qualquer uma das alternativas garantiria a independência funcional, sendo o caminho percorrido na segunda etapa de seleção o representado na Figura 7.29.

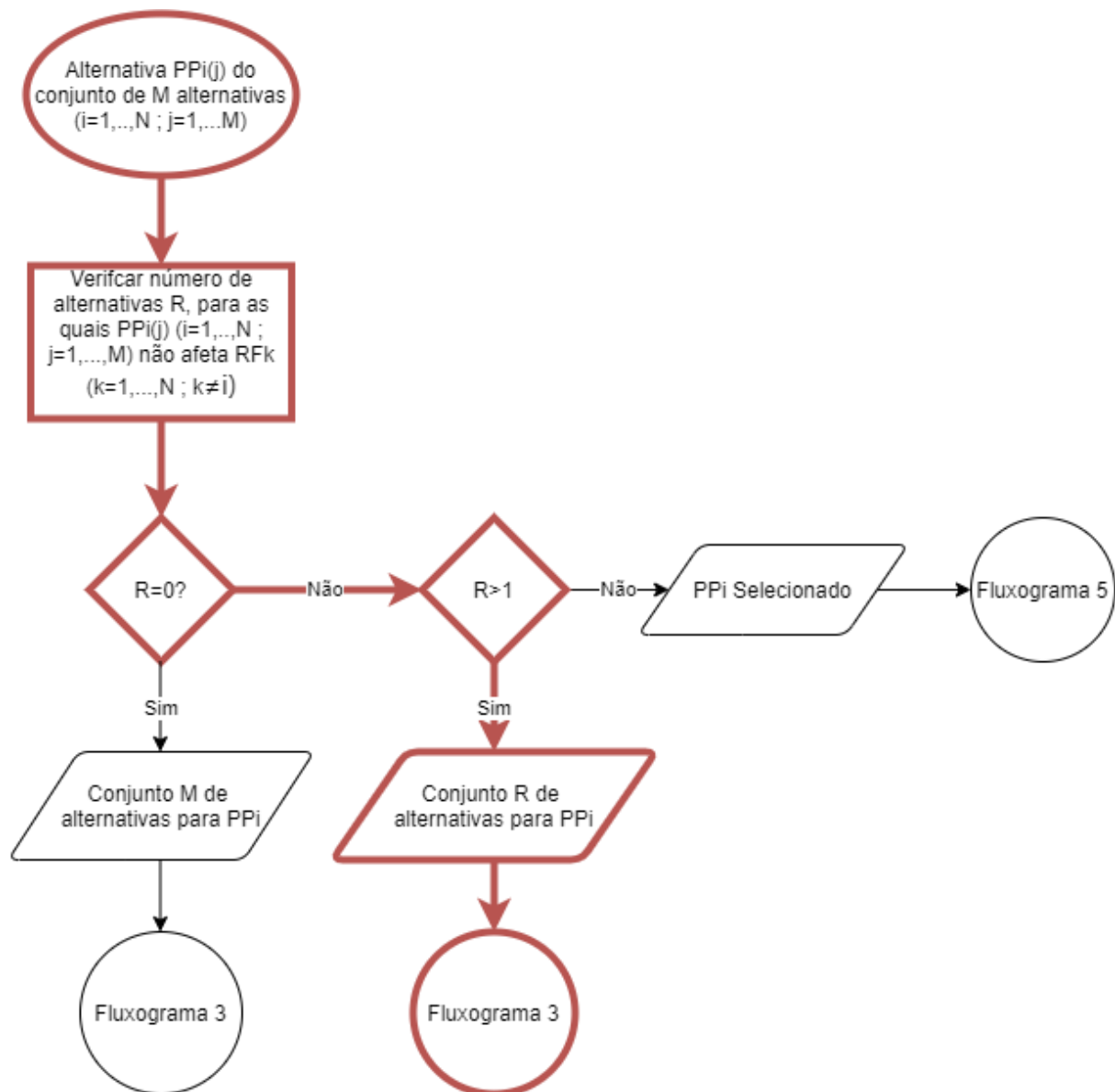


Figura 7.29 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1.2.1}$

Passando assim a existir um conjunto R de alternativas que seria analisado pelo Fluxograma 3, como se pode ver representado na Figura 7.30. uma vez que nenhuma das soluções contemplavam componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas, manteve-se o conjunto R .

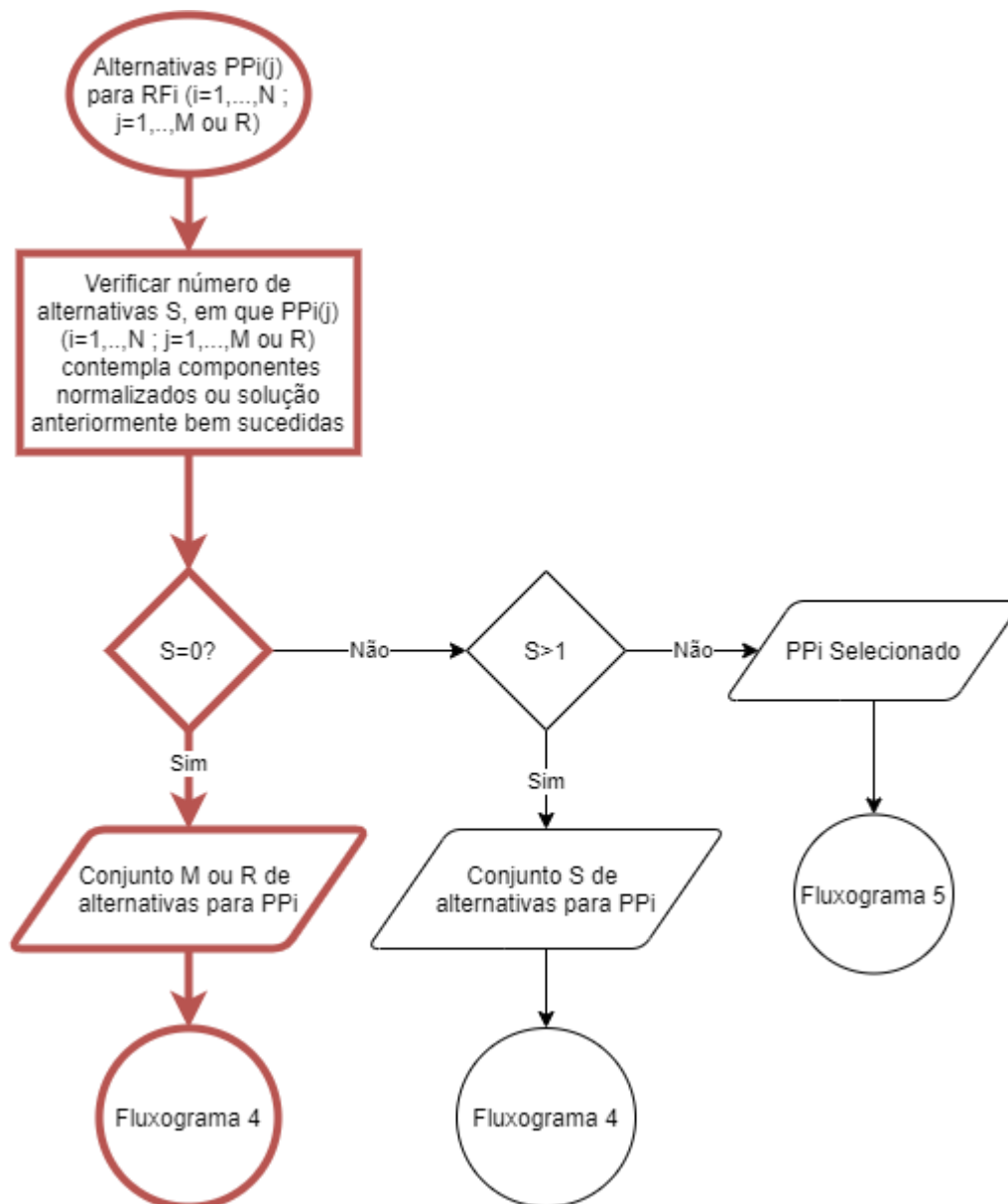


Figura 7.30 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.2.1}$

Passou-se então para a quarta etapa, fazendo-se a avaliação do grau de conflito para o conjunto R de soluções representada na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Análise das soluções alternativas para $RF_{1.2.1}$ face aos constrangimentos existentes

$RF_{1.2.1}$	Soluções Alternativas		
Inserir e retirar as pinças da carga	$PP_{1.2.1(1)}$	$PP_{1.2.1(2)}$	$PP_{1.2.1(3)}$
	Pinças com sistema de movimento linear no topo	Pinças com sistema de movimento rotativo	Pinças com sistema de movimento linear na extremidade
Constrangimentos	Grau de conflito		
C_2 Configuração Geométrica da Carga (encaixes na base)	0	1	0
C_4 Distância Máxima entre o Veículo e a Carga	0	0	1
C_{11} Espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução	0	0	1
$PP_{1.3}$ Pórtico para movimentação da Carga suspensa	1	0	0
Σ	1	1	2

A solução $PP_{1.2.1(1)}$ e a solução $PP_{1.2.1(2)}$ apresentavam o mesmo valor para o grau de conflito. Foi então avaliado o fator de relevância para os constrangimentos, ou PPs , para os quais as soluções alternativas tinham graus de conflito diferentes. A configuração geométrica da carga apresentava um maior grau de conflito para a solução $PP_{1.2.1(2)}$ dado que devido ao espaço reduzido para inserção das pinças, receava-se que se exigisse uma grande precisão do sistema com movimento rotativo das pinças. Relativamente ao grau de conflito com $PP_{1.3}$, a solução $PP_{1.2.1A}$ apresentava um maior grau de conflito, uma vez que este sistema previa a movimentação da carga suspensa, teria que existir uma ligação entre as soluções a partir do topo das pinças, logo, ter um sistema de movimentação no topo das pinças representaria maiores dificuldades na ligação física entre estas duas soluções. Ainda assim, previa-se que o espaço limitado para a inserção das pinças fosse um constrangimento que ofereceria maiores dificuldades ao desenvolvimento da solução do que a interligação com o pórtico de movimentação da carga, portanto teria um fator de relevância maior, como apresentado na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Grau de conflitos das soluções alternativas para $RF_{1.2.1}$ com os constrangimentos com maior fator de relevância

$RF_{1.2.1}$		Inserir e retirar as pinças da carga	
Soluções Alternativas		$PP_{1.2.1(1)}$	$PP_{1.2.1(2)}$
		Pinças com sistema de movimento linear no topo	Pinças com sistema de movimento rotativo
Constrangimento	Fator de relevância	Grau de conflito	
G_2 Configuração Geométrica da Carga (encaixes na base)	2	0	1
$PP_{1.3}$ Pórtico para movimentação da Carga suspensa	1	1	0
Σ		1	2

A solução selecionada foi então a $PP_{1.2.1(1)}$, por ser a que tinha um menor grau de conflito face aos constrangimentos com maior fator de relevância. O fluxo seguido, pela quarta etapa da metodologia, para a seleção deste parâmetro de projeto foi o que se encontra representado na Figura 7.31.

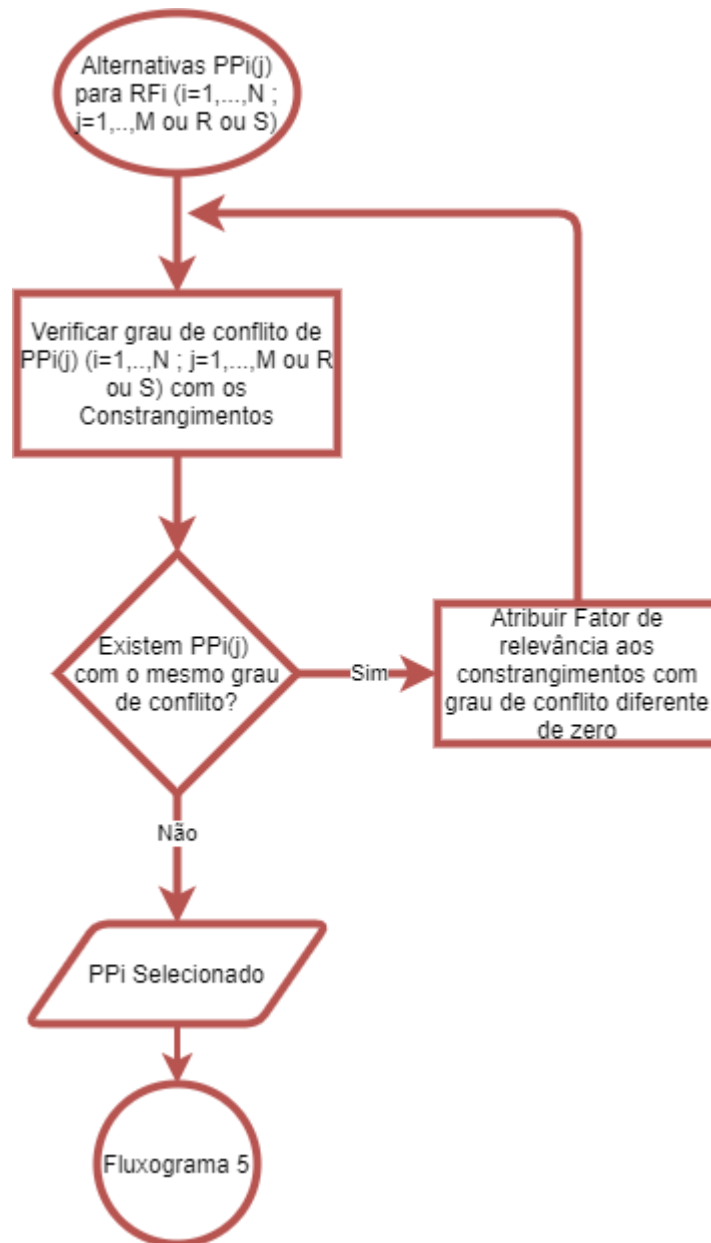


Figura 7.31 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.2.1}$

Para a solução definida para movimentar a carga, $RF_{1.3}$, que consistia num pórtico para movimento da carga suspensa, $PP_{1.3}$, este teria que ter a funcionalidade de elevar a carga e de a movimentar horizontalmente para a colocar sobre o transportador. Os requisitos funcionais seriam os seguintes:

- $RF_{1.3.1}$ Elevar a carga;
- $RF_{1.3.2}$ Movimentar a carga horizontalmente.

Para elevar a carga, $RF_{1.3.1}$, sabia-se à partida que para além do peso da carga a solução teria que elevar todo o sistema de pinças definido para pegar e largar a carga $PP_{1.2}$. Não existindo informação nesta fase sobre qual seria o peso dessa solução, foi aplicado mais uma vez o Corolário 3 da TAP, estabelecendo uma tolerância ampla para o valor do peso que esta solução teria que elevar. Foram

geradas três alternativas ilustradas na Figura 7.32, sistema de parafuso sem-fim, $PP_{1.3.1(1)}$, sistema de elevação com tesoura, $PP_{1.3.1(2)}$, e sistema com diferencial de corrente elétrica $PP_{1.3.1(3)}$.

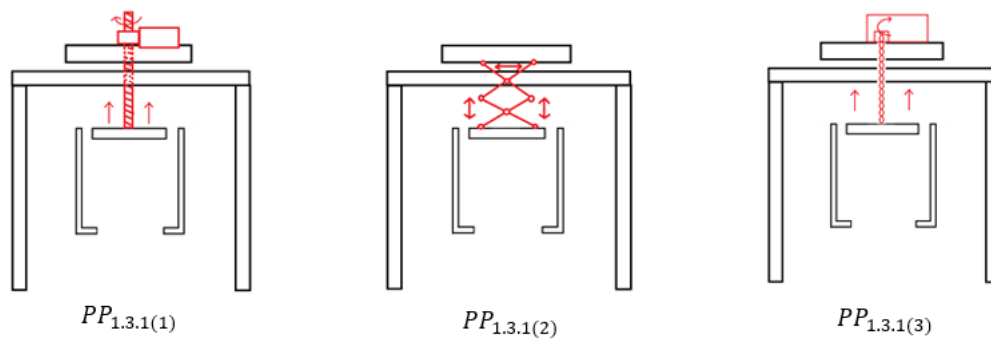


Figura 7.32 - Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.3.1}$

A primeira etapa ficou então definida pelo caminho representado na Figura 7.33.

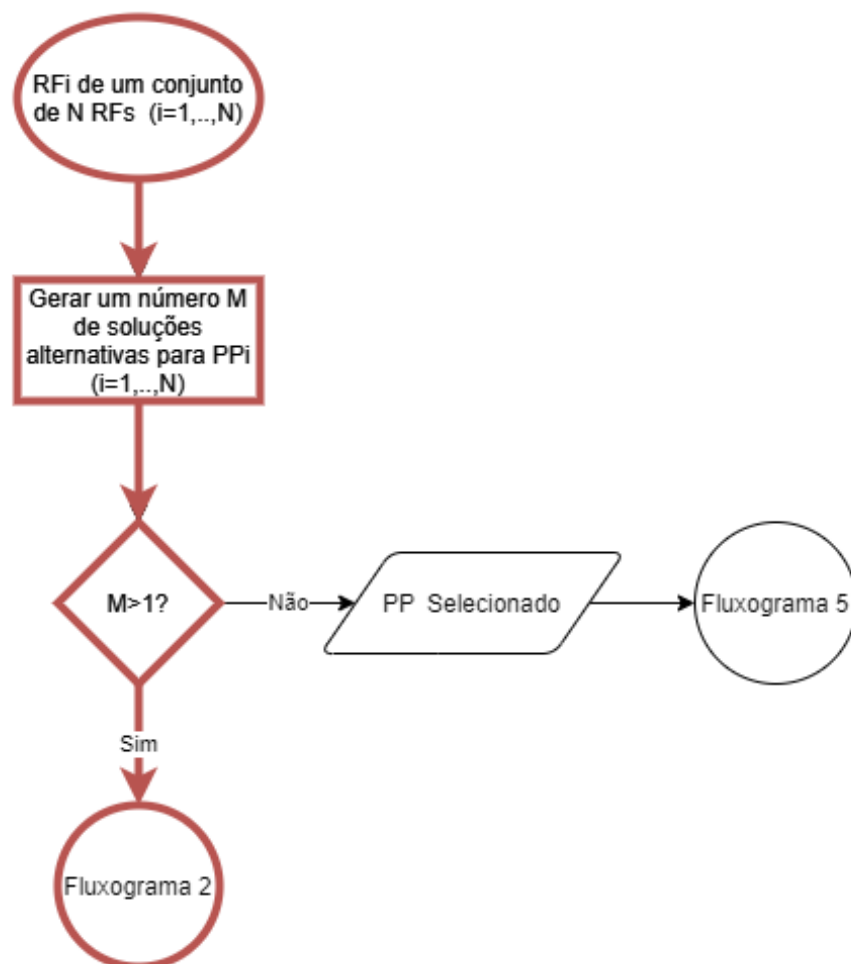


Figura 7.33 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.3.1}$

Passou-se de seguida o conjunto M de soluções para a segunda etapa de seleção como representado na Figura 7.34.

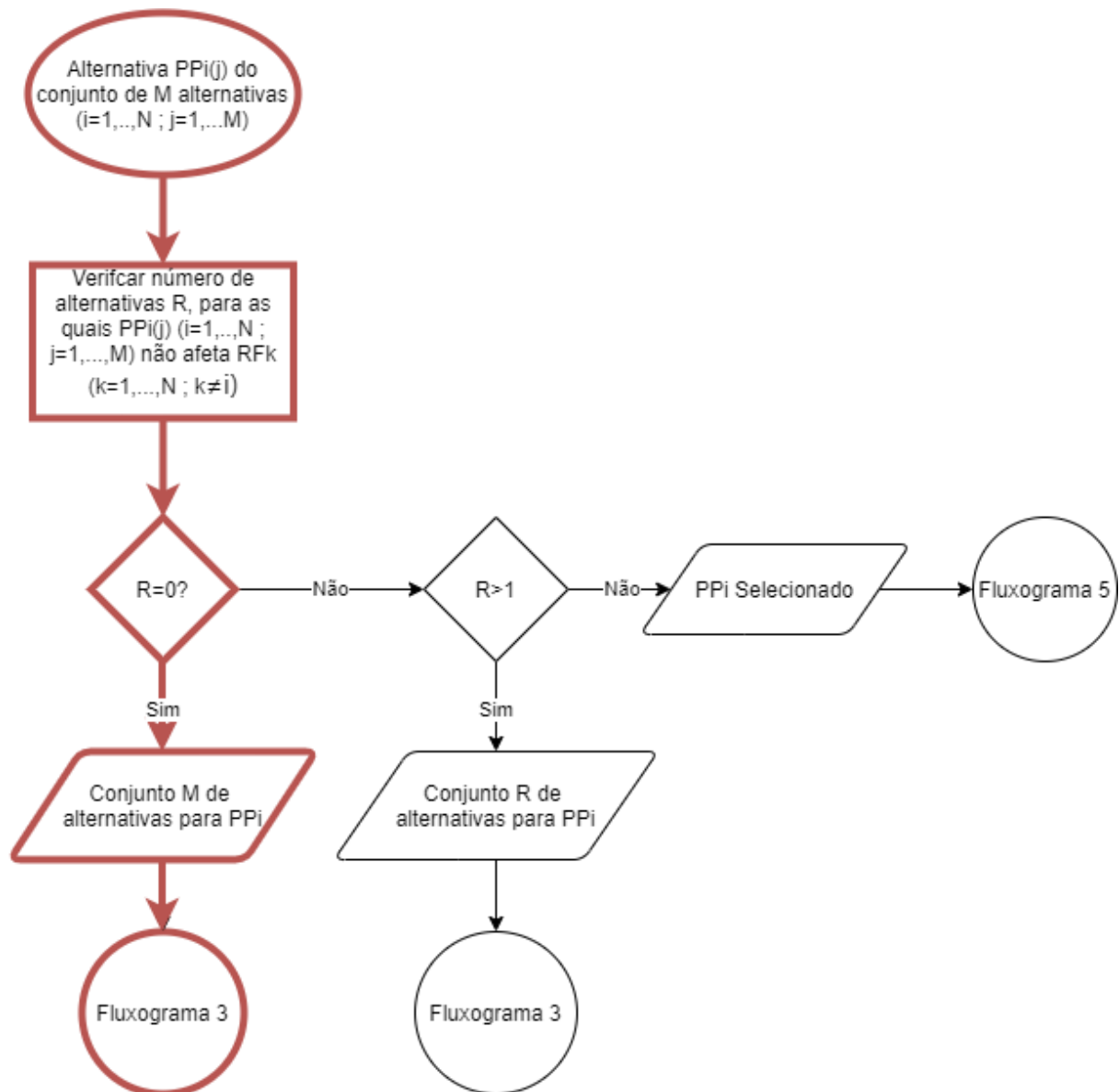


Figura 7.34 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1.3.1}$

Qualquer uma das soluções alternativas para elevação da carga, afetavam o requisito funcional de movimentação horizontal, uma vez que esta funcionalidade estaria dependente a elevação da carga, permanecendo-se com um conjunto M de soluções alternativas.

Passou-se assim à 3ª etapa de seleção e que pode ser representada pela Figura 7.35.

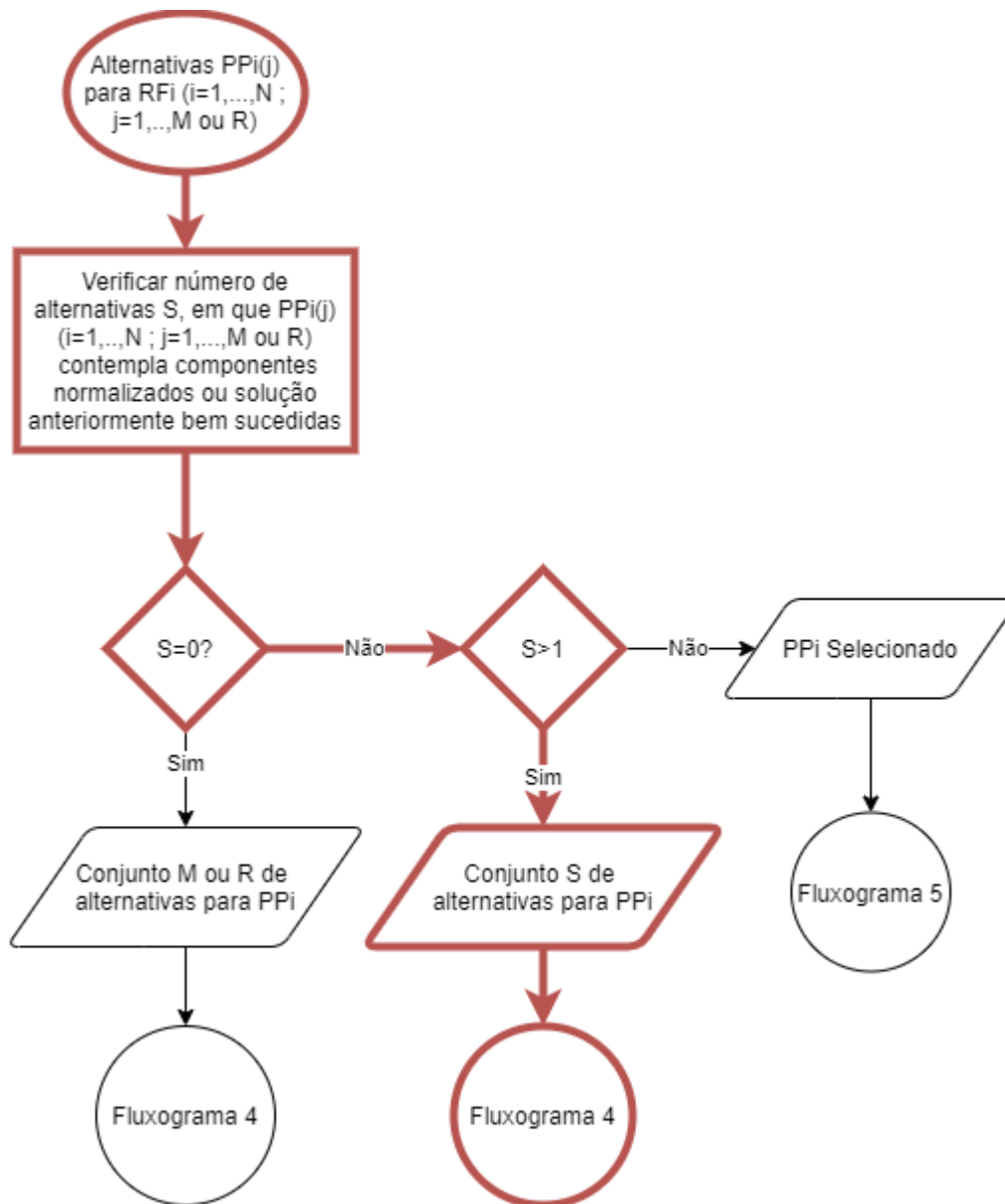


Figura 7.35 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.3.1}$

Desta etapa resultou um conjunto S com duas soluções, $PP_{1.3.1(1)}$ e $PP_{1.3.1(3)}$, por se tratarem das soluções que previam a utilização de componentes normalizados para realizar a funcionalidade pretendida.

Passou-se então para a quarta etapa de seleção, avaliando os graus de conflito com os constrangimentos de ambas as soluções, como demonstrado na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Análise das soluções alternativas para $RF_{1.3.1}$ face aos constrangimentos existentes

$RF_{1.3.1}$	Soluções Alternativas	
Elevar a Carga	$PP_{1.3.1(1)}$	$PP_{1.3.1(3)}$
	Sistema de parafuso sem-fim	Sistema com diferencial de corrente elétrico
Constrangimento	Grau de conflito	
C_1 Peso máximo da Carga	1	0
C_8 Tempo de ciclo máximo	1	0
C_{11} Espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução	1	0
$PP_{1.2}$ Sistema com pinças laterais no sentido do comprimento	1	1
$PP_{1.3}$ Pórtico para movimentação da carga suspensa	2	1
Σ	6	2

Dado o grau de conflito, a solução escolhida foi a $PP_{1.3.1(3)}$ tendo sido o processo de seleção desta etapa o representado na Figura 7.36.

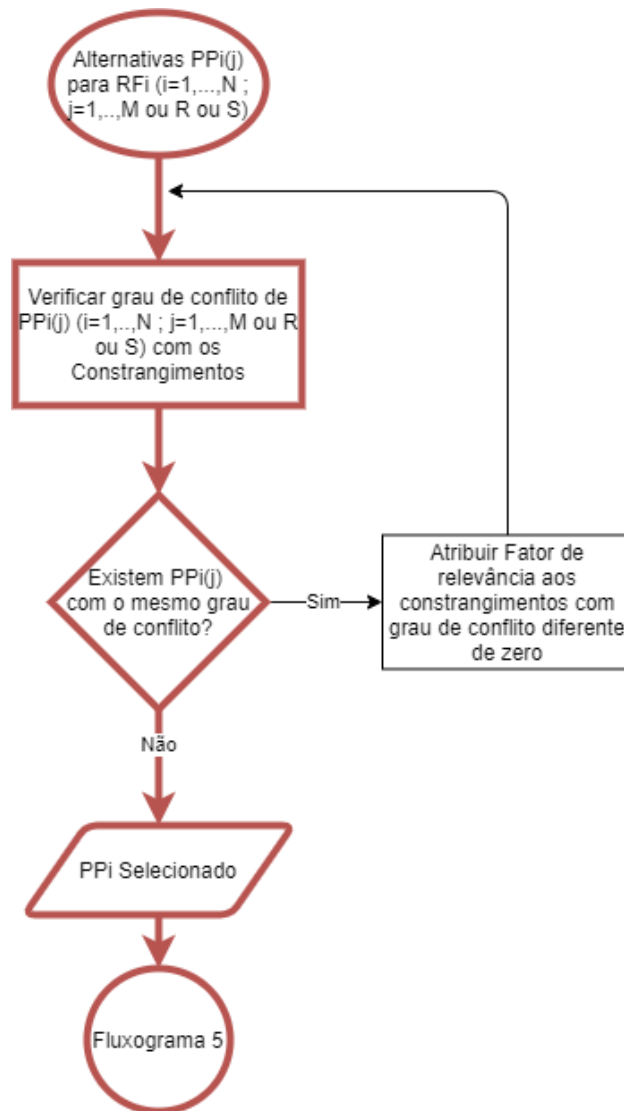


Figura 7.36 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.3.1}$

Para movimentar a carga horizontalmente, $RF_{1.3.2}$, foi considerada a opção de realizar este movimento através de um sistema de movimentação com o motor fixo, $PP_{1.3.2(1)}$ ou através de um sistema de movimentação com o motor móvel, $PP_{1.3.2(2)}$, as soluções encontram-se ilustradas na Figura 7.38.

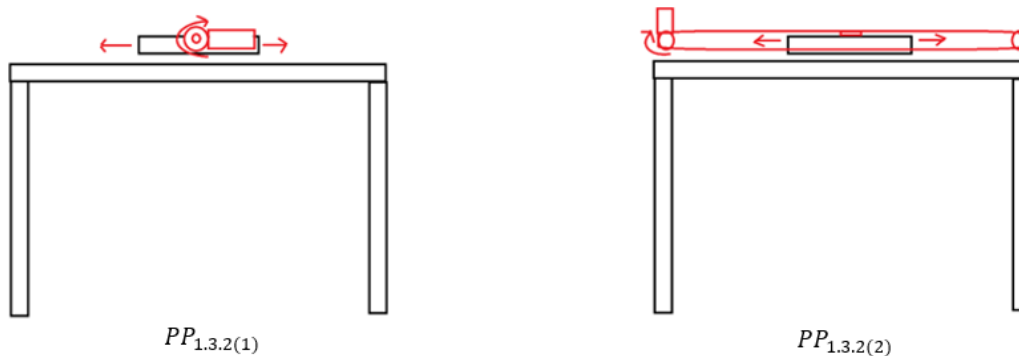


Figura 7.37 - Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.3.2}$

A primeira etapa ficou então definida pelo caminho representado na Figura 7.38.

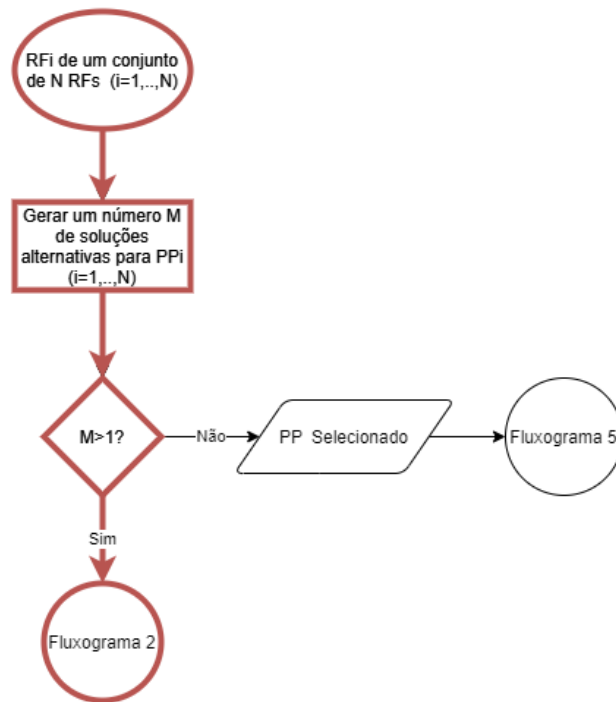


Figura 7.38 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.3.2}$

Passou-se de seguida o conjunto M de soluções para a segunda etapa de seleção como representado na Figura 7.39.

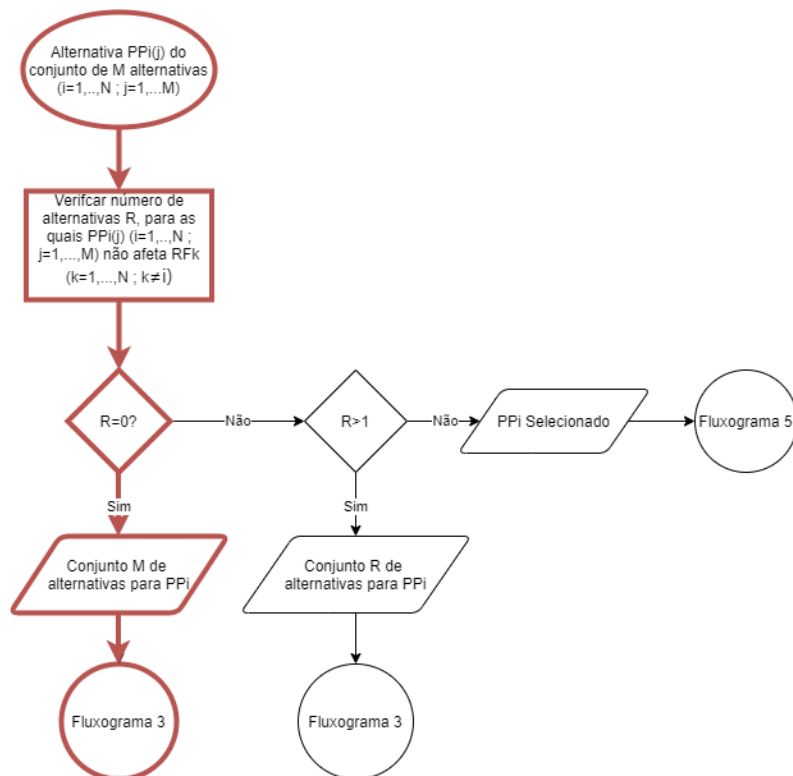


Figura 7.39 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1.3.2}$

Qualquer uma das soluções alternativas para a movimentação horizontal da carga, afetavam o requisito funcional de elevação da carga, uma vez que esta funcionalidade estaria dependente do movimento horizontal, permanecendo-se com um conjunto M de soluções alternativas. Passou-se o conjunto S para a 3ª etapa de seleção e que está representada na Figura 7.40.

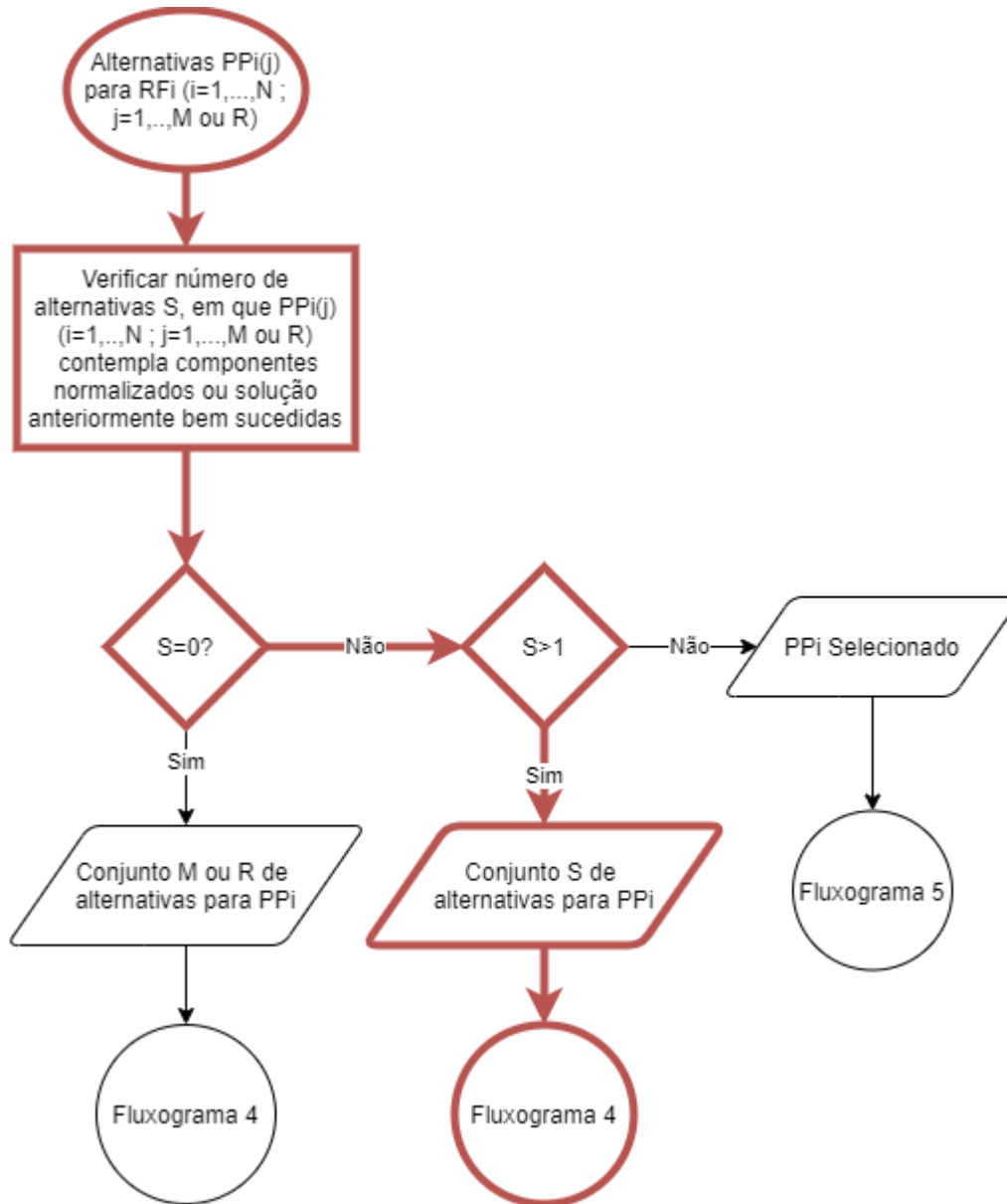


Figura 7.40 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.3.1}$

Mantiveram-se ambas as soluções como alternativa uma vez que ambas previam a utilização de componentes normalizados para realizar a funcionalidade pretendida.

Passou-se então para a quarta etapa de seleção, avaliando os graus de conflito com os constrangimentos de ambas as soluções, como mostrado na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Análise das soluções alternativas para $RF_{1.3.2}$ face aos constrangimentos existentes

$RF_{1.3.2}$	Soluções Alternativas	
Movimentar a Carga Horizontalmente	$PP_{1.3.2(1)}$	$PP_{1.3.2(2)}$
	Sistema de movimentação com motor fixo	Sistema de movimentação com motor móvel
Constrangimento	Grau de conflito	
C_8 Tempo de ciclo máximo	0	1
Σ	0	1

Identificaram-se vantagens para a solução $PP_{1.3.2(1)}$ face ao constrangimento do tempo de ciclo, C_8 . Prevvia-se que, caso fosse necessário movimentar horizontalmente o sistema a uma velocidade mais elevada, poderia ser mais complicado desenvolver uma solução com o motor móvel que o permitisse, podendo ser representado esta etapa da metodologia pela Figura 7.41.

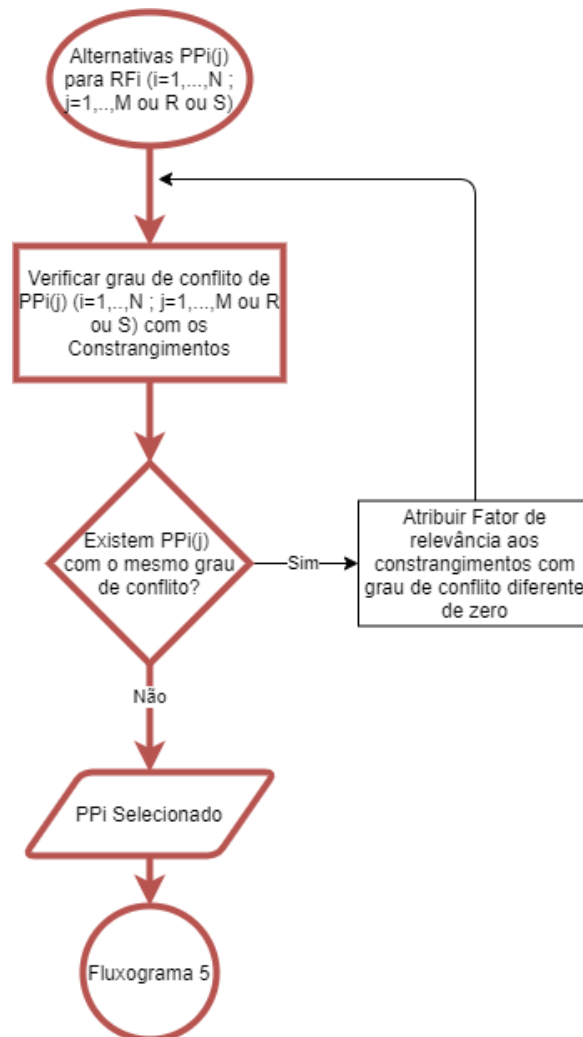


Figura 7.41 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.3.2}$

7.5.2. Etapa 5 - Verificação dos constrangimentos entre *PPs*

A decomposição da solução no domínio funcional e no domínio físico, neste nível, encontra-se representada na Figura 7.42 e Figura 7.43, respetivamente.

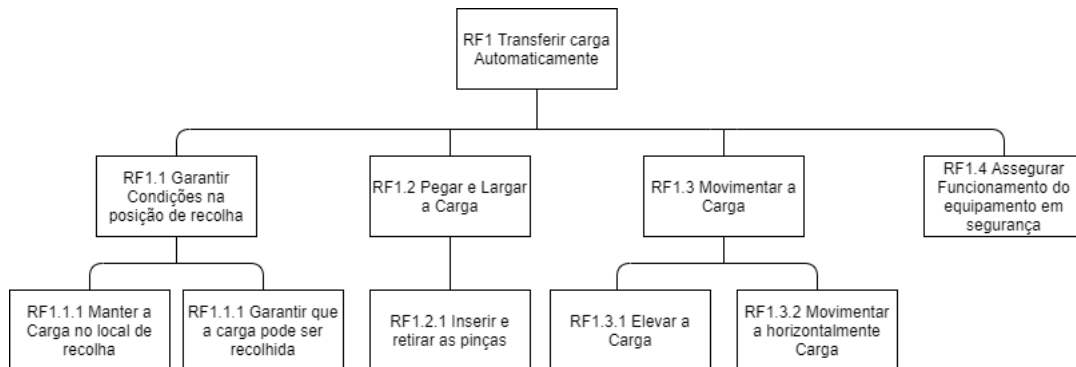


Figura 7.42 - Segundo Nível de Decomposição dos Requisitos Funcionais

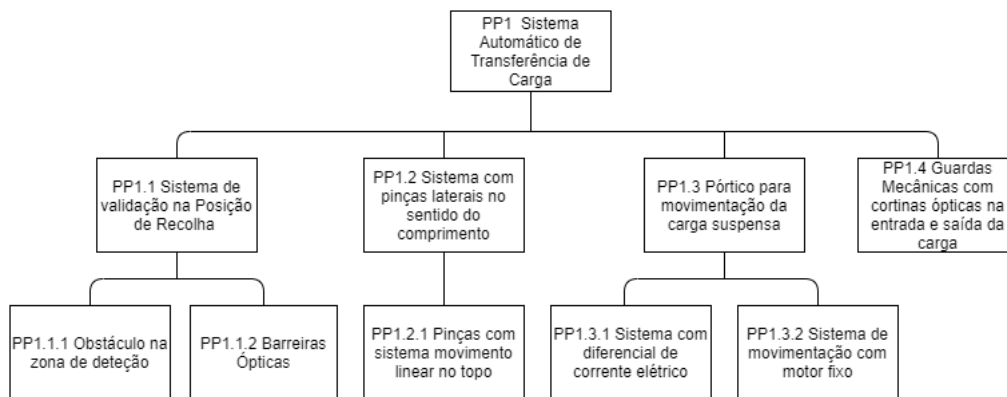


Figura 7.43 - Segundo Nível de Decomposição dos Parâmetros de Projeto

Para validar, finalmente, o conjunto de *PPs* selecionados foi então feita a matriz de constrangimentos apresentada na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Matriz de constrangimentos entre *PPs* do segundo nível de decomposição

	$PP_{1.1.1}$	$PP_{1.1.2}$	$PP_{1.2.1}$	$PP_{1.3.1}$	$PP_{1.3.2}$
$PP_{1.1.1}$	-	0	0	0	0
$PP_{1.1.2}$	0	-	0	0	0
$PP_{1.2.1}$	0	0	-	0	0
$PP_{1.3.1}$	0	0	0	-	C
$PP_{1.3.2}$	0	0	0	C	-

Como se pode verificar na Tabela 7.8, $PP_{1.3.1}$ e $PP_{1.3.2}$ apresentavam constrangimentos entre si, constituindo um conjunto C , que deveria ser revisto pelo Fluxograma 5.1, como representado na Figura 7.44.

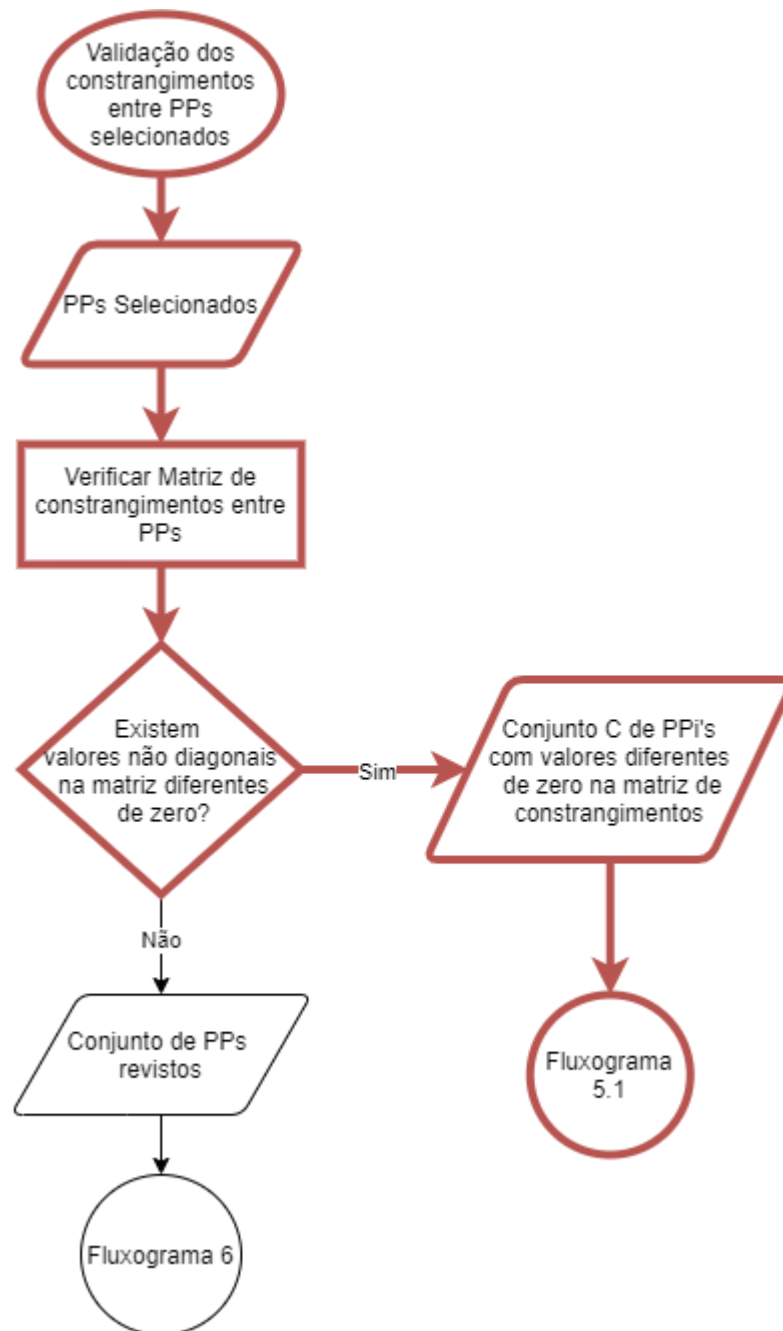


Figura 7.44 – Fluxograma 5 para o segundo nível de decomposição

Ambos os parâmetros de projeto foram selecionados a partir de um conjunto S de soluções alternativas, tendo sido verificado para ambos se existiam soluções alternativas que eliminassem estes constrangimentos, sendo o percurso percorrido o mesmo, como se encontra representado na Figura 7.45.

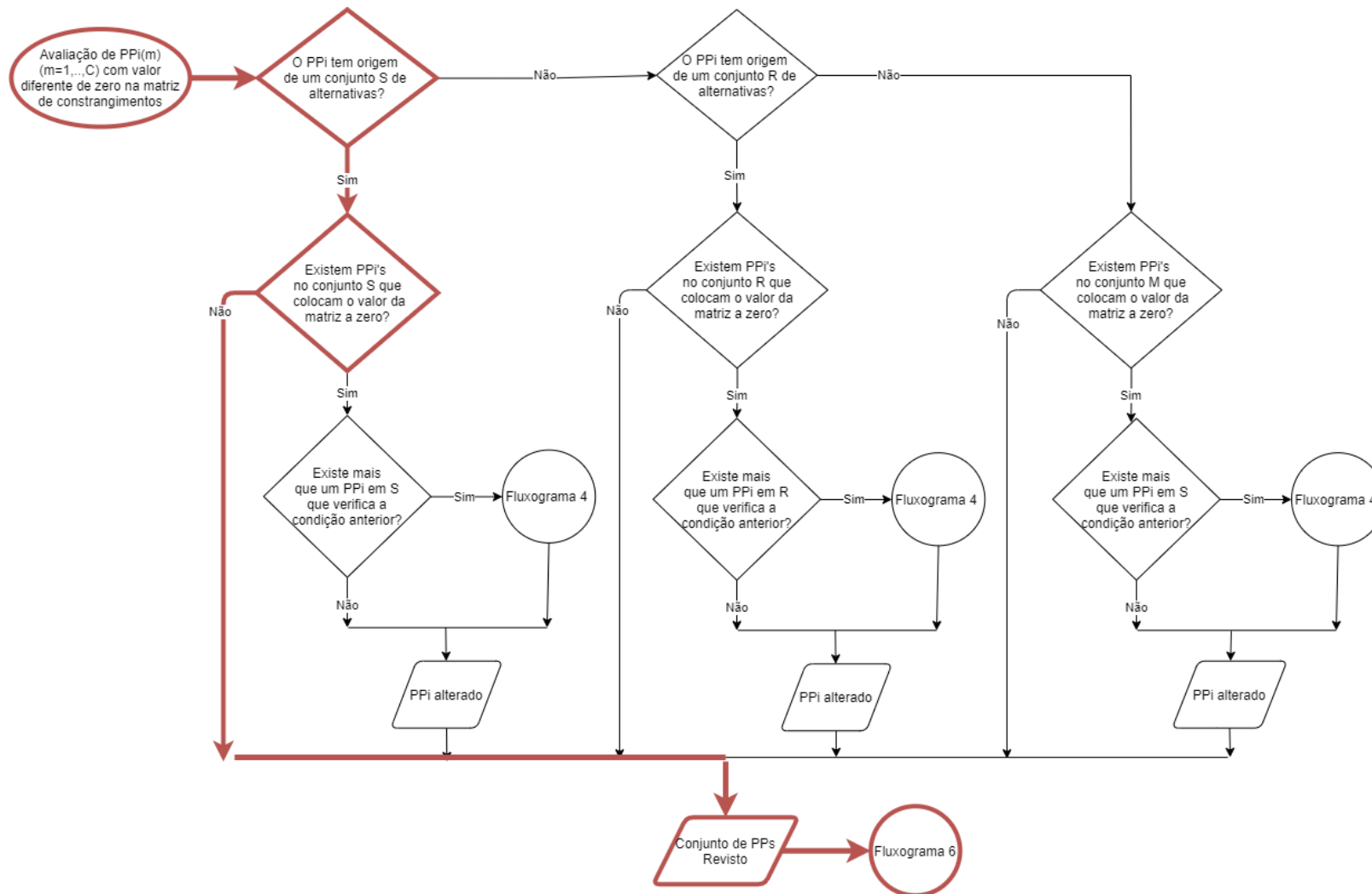


Figura 7.45 – Fluxograma 5.1 para $PP_{1.3.1}$ e $PP_{1.3.2}$

Não existindo soluções alternativas do conjunto S que eliminassem o constrangimento, mantiveram-se os parâmetros de projeto selecionados. Ficando assim o conjunto de PPs revistos e passando o mesmo para a próxima etapa de validação da metodologia.

7.5.3. Etapa 6 - Validação pelo 1º Axioma da TAP

Procede-se então à validação do conjunto de soluções definidas perante o primeiro axioma da TAP. Analisando as equações de projeto separadamente para cada Parâmetro de projeto decomposto, temos para a decomposição $PP_{1.1}$ a seguinte equação de projeto:

$$\begin{Bmatrix} RF_{1.1.1} \\ RF_{1.1.2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_{1.1.1} \\ PP_{1.1.2} \end{Bmatrix} \quad (7.2)$$

Como se pode verificar pela matriz de projeto, trata-se de um projeto desacoplável. O requisito $RF_{1.1.2}$, garantir que a carga pode ser recolhida, só atua quando a mesma é mantida no local de recolha, funcionalidade realizada pelo obstáculo na zona de deteção do veículo, $PP_{1.1.1}$. Assim sendo, o primeiro axioma estaria validado, sendo o percurso percorrido para este conjunto de PPs o representado na Figura 7.46.

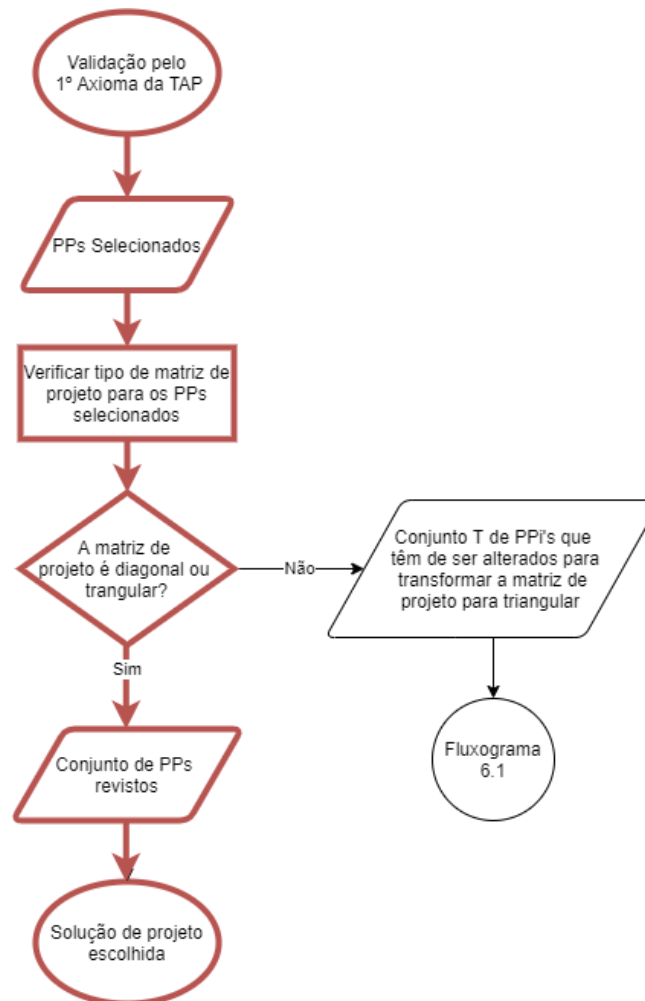


Figura 7.46 – Fluxograma 6 para $PP_{1.1.1}$ e $PP_{1.1.2}$

Para a decomposição de $PP_{1,2}$, tendo sido decomposta em apenas um requisito funcional, a equação seria descrita por:

$$\{RF_{1.2.1}\} = [X]\{PP_{1.2.1}\} \quad (7.3)$$

Para a decomposição de $PP_{1,3}$, a equação de projeto seria descrita por

$$\begin{Bmatrix} RF_{1.3.1} \\ RF_{1.3.2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_{1.3.1} \\ PP_{1.3.2} \end{Bmatrix} \quad (7.4)$$

Para este conjunto de PPs selecionados resultou também um projeto acoplado, uma vez que a função de elevação da carga e de movimentação horizontal da carga estavam dependentes uma da outra. Existindo apenas dois parâmetros de projeto, e tendo as soluções alternativas passado pela segunda etapa de seleção da metodologia, sabe-se que não existiam soluções no conjunto de alternativas, quer para um parâmetro de projeto quer para outro, que transformassem a matriz de projeto para uma com configuração triangular. O fluxo percorrido na metodologia seria o representado na Figura 7.47 e pela Figura 7.48 para a revisão dos respectivos PPs .

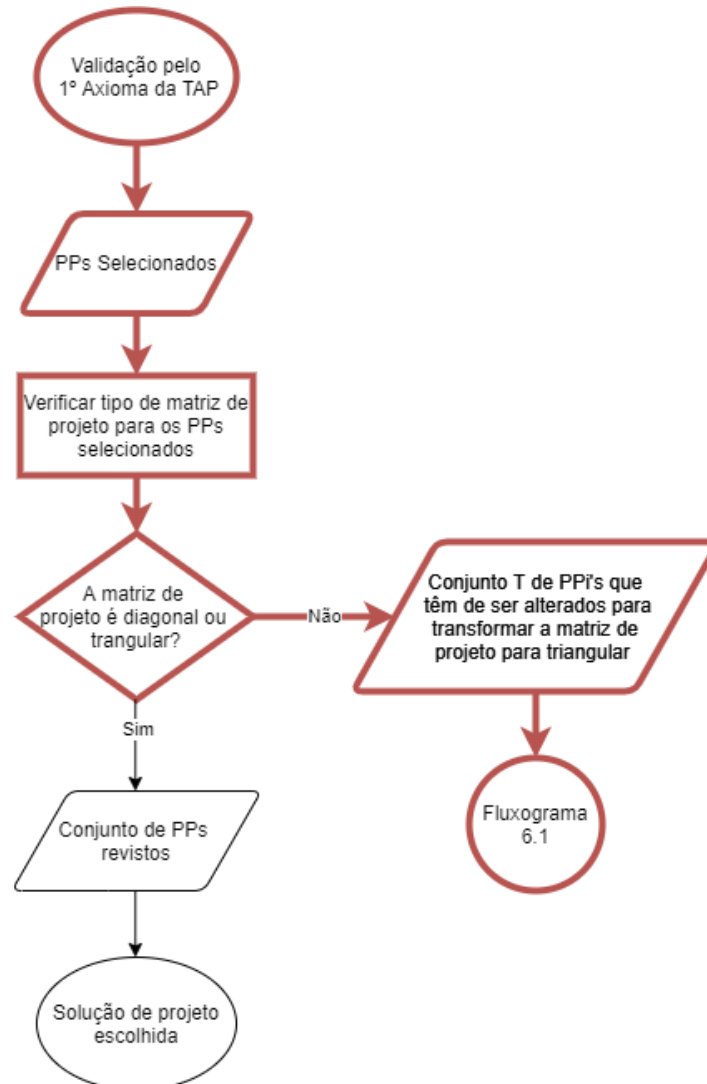


Figura 7.47 – Fluxograma 6 para $PP_{1.3.1}$ e $PP_{1.3.2}$

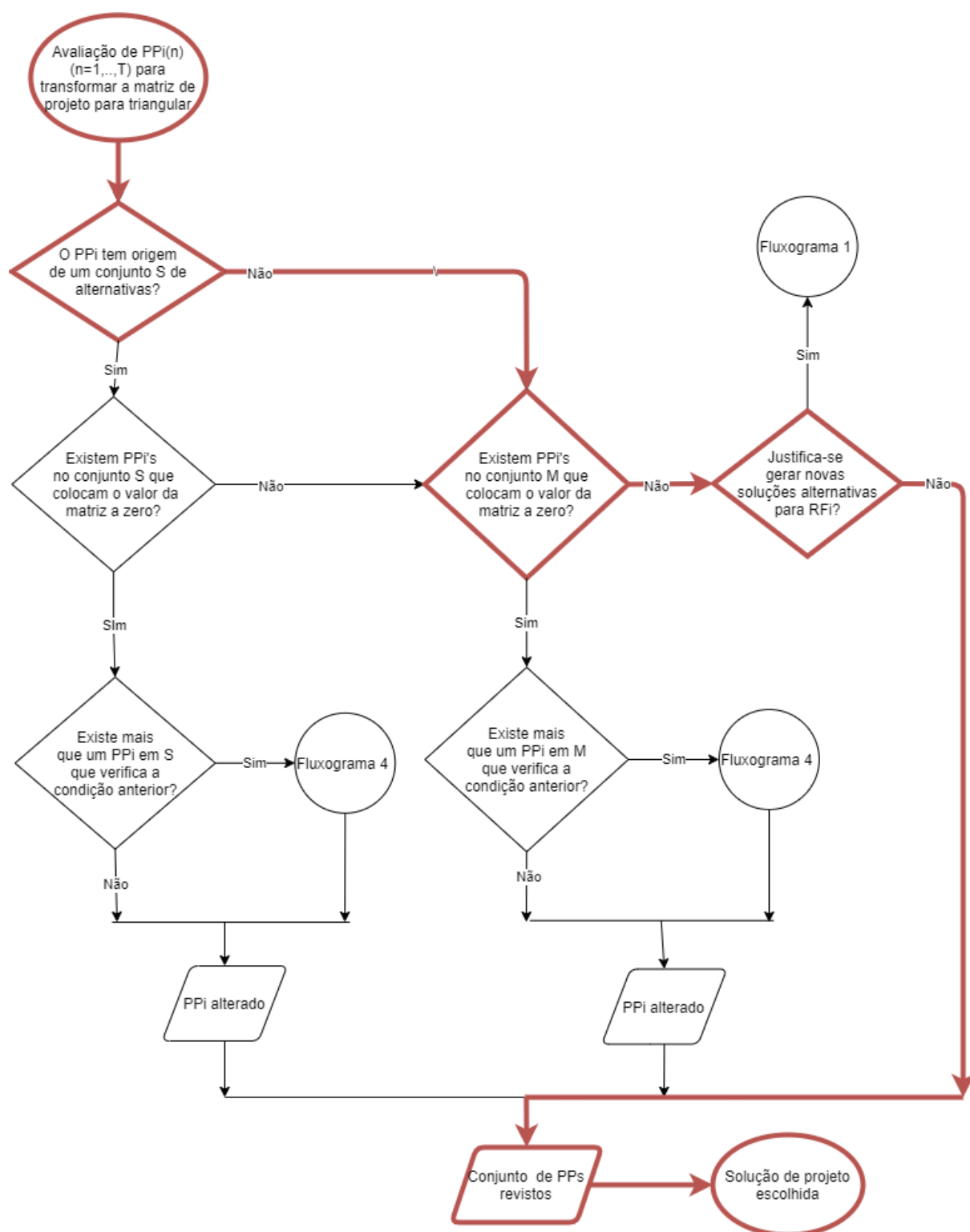


Figura 7.48- Fluxograma 6.1 para $PP_{1.3.1}$ e $PP_{1.3.2}$

7.6. Terceiro Nível de Decomposição

7.6.1. Etapa 1 a 4 - Seleção dos Parâmetros de Projeto

Para o $PP_{1.1.1}$, que consistia num obstáculo colocado na zona de deteção do veículo, pretendia-se que esse obstáculo fosse colocado e retirado na referida zona de deteção, mas apenas se o veículo transportasse a carga, caso contrário não haveria necessidade de manter o veículo na posição de recolha. Pode-se então definir os seguintes requisitos funcionais para $PP_{1.1.1}$:

- $RF_{1.1.1.1}$ Detetar carga no veículo

- $RF_{1.1.1.2}$ Colocar e retirar obstáculo na zona de deteção

Para detetar a carga no veículo, $RF_{1.1.1.1}$, foi apenas considerada a solução de ter uma fotocélula com atuação por interrupção de feixe, $PP_{1.1.1.1}$, tendo sido o fluxo percorrido o representado na Figura 7.49.

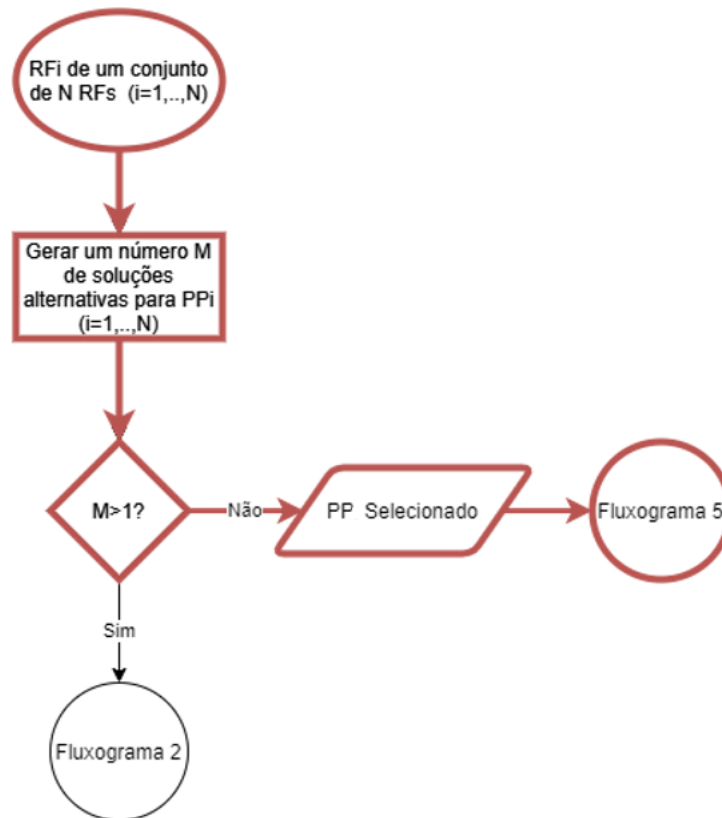


Figura 7.49 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.1.1}$

Para o requisito funcional de colocar e retirar obstáculo da zona de deteção, $RF_{1.1.1.2}$ foram consideradas opções ilustradas na Figura 7.50. A opção $PP_{1.1.1.2(1)}$, consistia numa porta de movimento vertical, a opção $PP_{1.1.1.2(2)}$ numa cancela com movimento rotativo e a opção $PP_{1.1.1.2(3)}$ numa cancela com movimento linear.

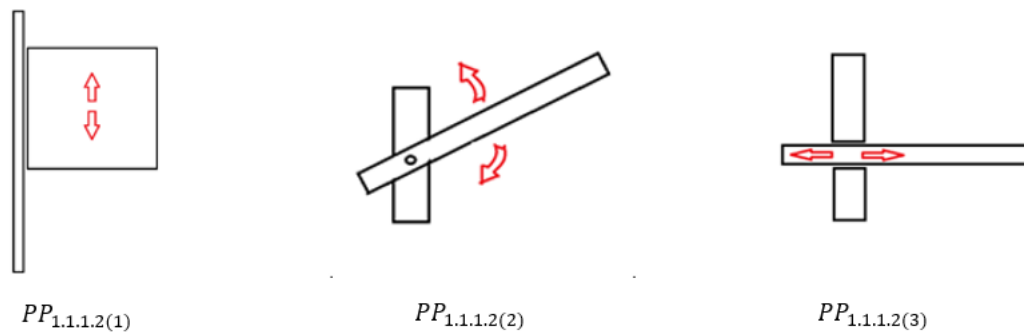


Figura 7.50 - Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.1.1.2}$

O fluxo seguido na primeira etapa da metodologia para $PP_{1.1.1.2}$ foi o representado na Figura 7.51.

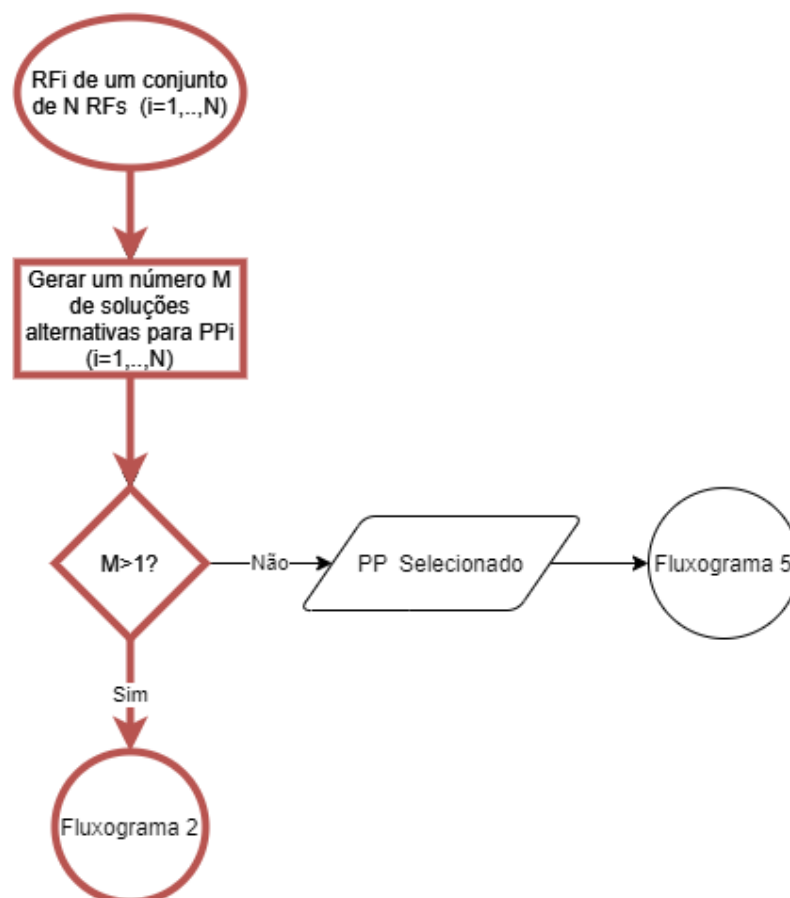


Figura 7.51 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.1.1.2}$

O conjunto M de soluções alternativas passou assim para a segunda etapa de seleção, representada na Figura 7.52.

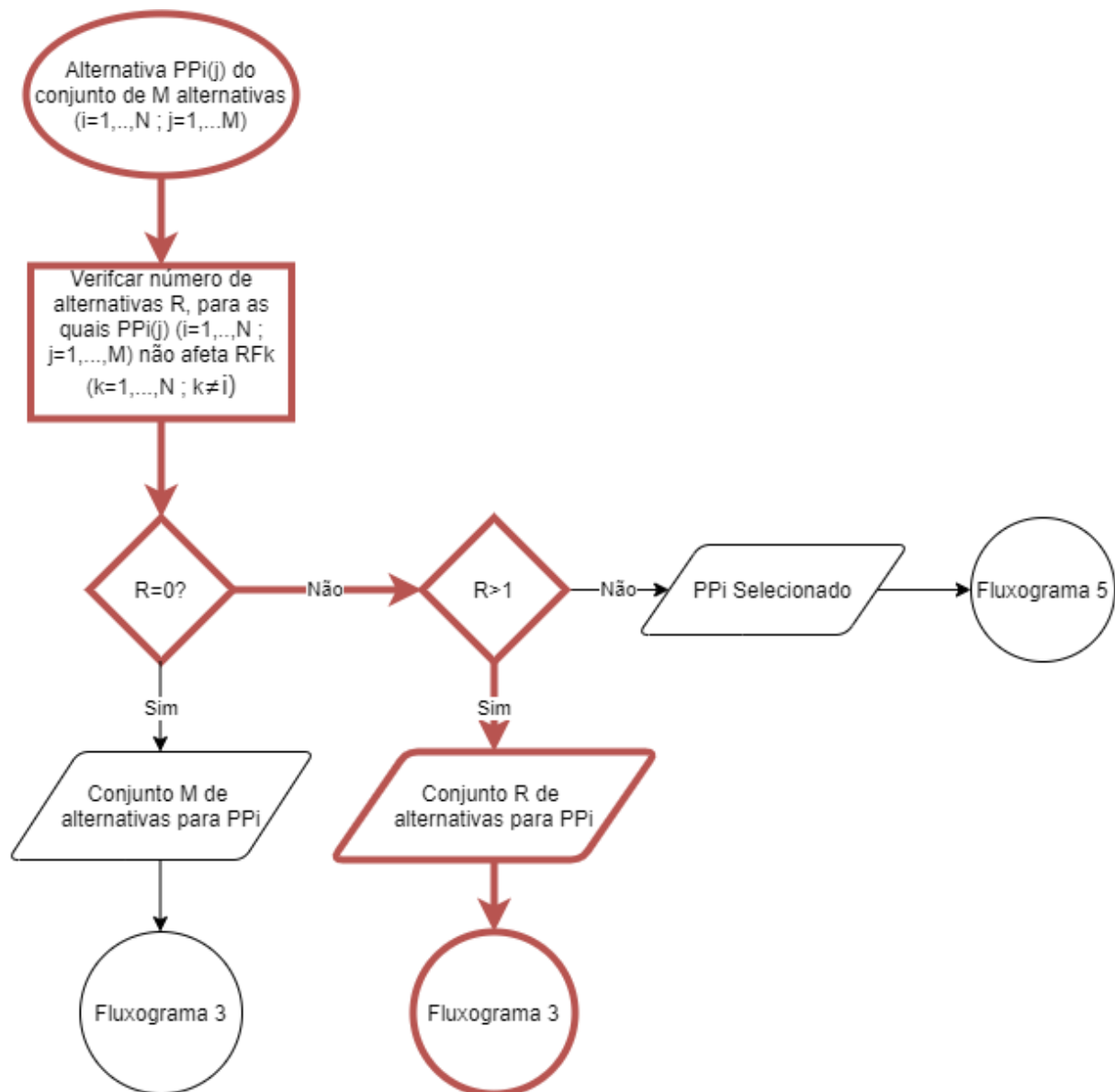


Figura 7.52 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1.1.1.2}$

Todas as soluções alternativas consideradas não afetavam o $RF_{1.1.1.1}$, ficando-se assim com o conjunto R de soluções, o qual passou para a 3ª Etapa de seleção, representada na Figura 7.53.

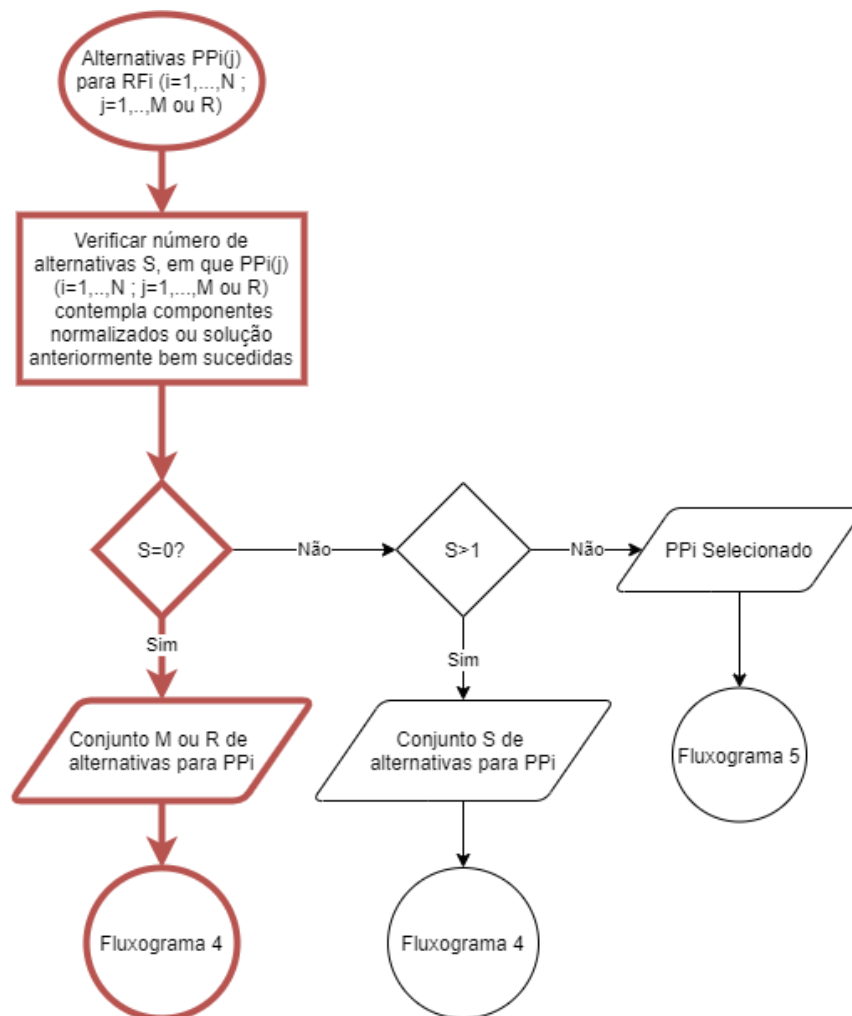


Figura 7.53 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.1.1.2}$

Nenhuma das soluções considerava, nesta fase, a aplicação de componentes normalizados ou soluções anteriormente bem sucedidas, permanecendo assim o mesmo conjunto de soluções alternativas para o qual foram avaliados os graus de conflito com os constrangimentos, representado na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 - Análise do grau de conflito das soluções alternativas para $RF_{1.1.1.2}$ com os constrangimentos

$RF_{1.1.1.2}$	Soluções Alternativas		
Colocar e retirar obstáculo da zona de detecção	$PP_{1.1.1.2(1)}$	$PP_{1.1.1.2(2)}$	$PP_{1.1.1.2(3)}$
	Porta de movimento vertical	Cancela com movimento rotativo	Cancela com movimento linear
Constrangimentos	Grau de conflito		
C_3 Dimensões máximas da carga	2	0	1
C_{11} Espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução	1	0	2
Σ	3	0	3

A solução escolhida foi a cancela rotativa $PP_{1.1.1.2(2)}$, por se tratar da solução que aparentava ter um menor grau de conflito para ser desenvolvida dentro dos constrangimentos existentes. Dadas as dimensões da carga, C_3 , previa-se que a solução da porta de movimento vertical, $PP_{1.1.1.2(1)}$, necessitasse de ter um curso muito elevado e perante o espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução, C_{11} . A solução da cancela com movimento linear, $PP_{1.1.1.2(3)}$ apresentava-se como menos favorável, devido ao espaço que a cancela ocuparia quando recolhida. Esta etapa de seleção encontra-se representada na Figura 7.54.

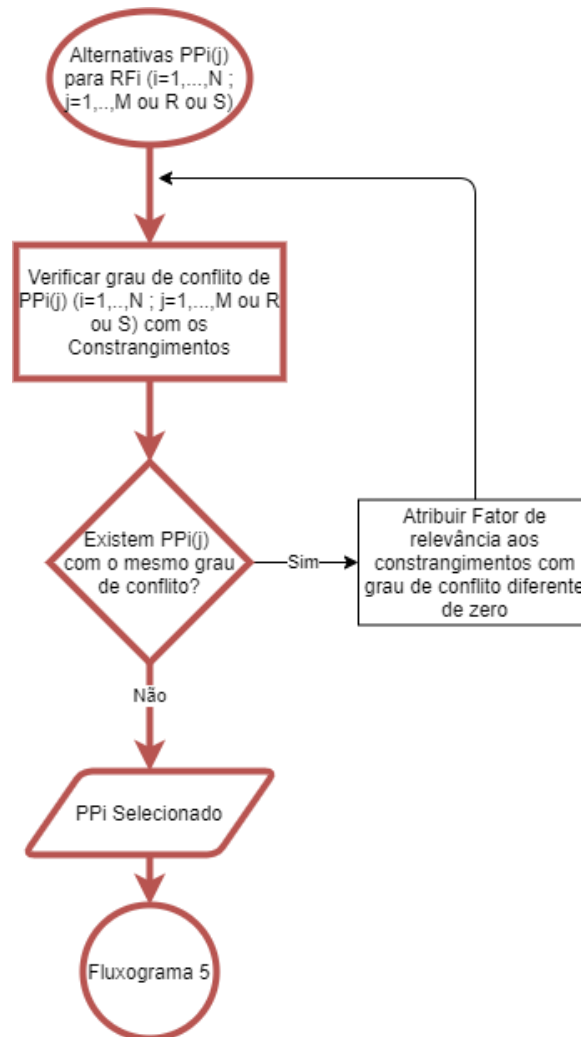


Figura 7.54 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.3.2}$

Para as pinças com sistema de movimento linear no topo, $PP_{1.2.1}$, necessitava-se que fosse criado movimento linear das pinças e que esse movimento fosse guiado, sendo então os requisitos funcionais para a solução:

- $RF_{1.2.1.1}$ Criar Movimento Linear;

- $RF_{1.2.1.2}$ Guiar Movimento Linear.

Para criar movimento linear consideraram-se três soluções, ilustradas na Figura 7.55, que seria ter o movimento efetuado por dois atuadores lineares pneumáticos, $PP_{1.2.1.1(1)}$, ter um sistema de cremalheiras e roda dentada com acionamento por motor elétrico, $PP_{1.2.1.1(2)}$, ou um sistema articulado com acionamento por atuador linear pneumático $PP_{1.2.1.1(3)}$.

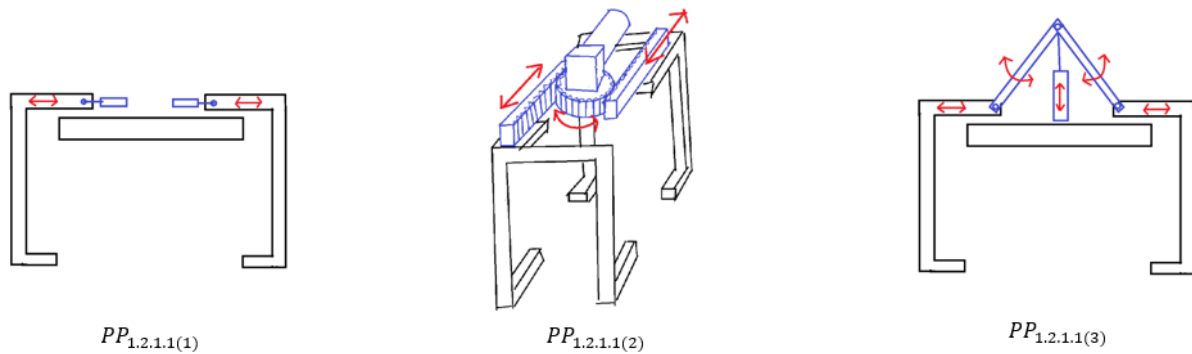


Figura 7.55 - Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.2.1.1}$

A fluxo da primeira etapa da metodologia para $PP_{1.2.1.1}$ encontra-se representado na Figura 7.51.

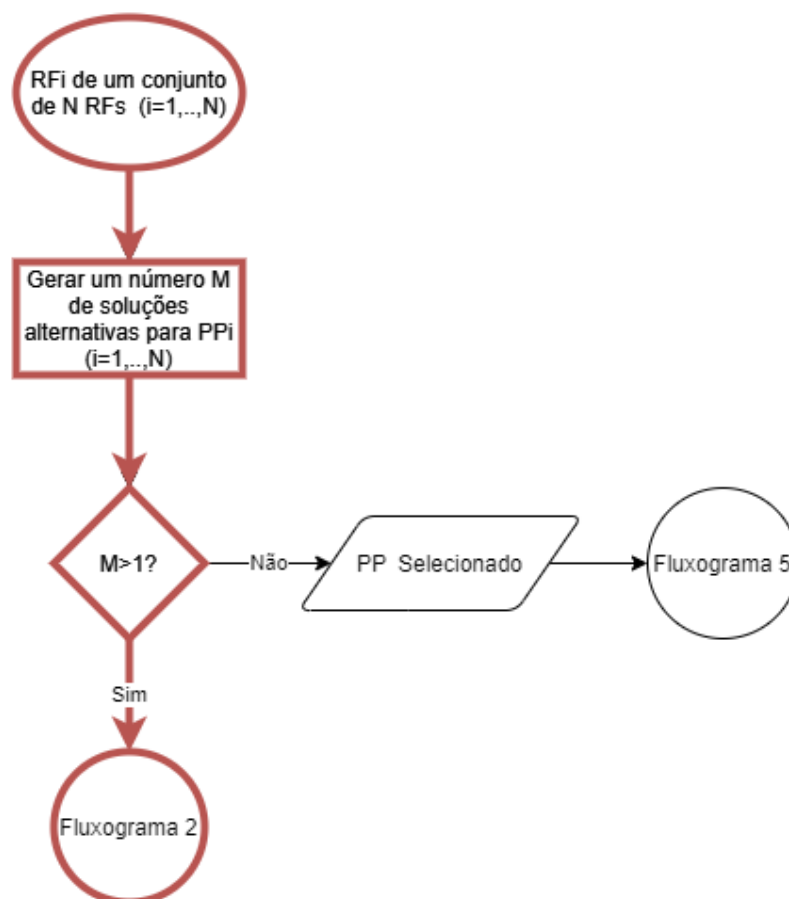


Figura 7.56 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.2.1.1}$

Passando para a segunda etapa, a análise do conjunto M de soluções alternativas pode ser representado pela Figura 7.57.

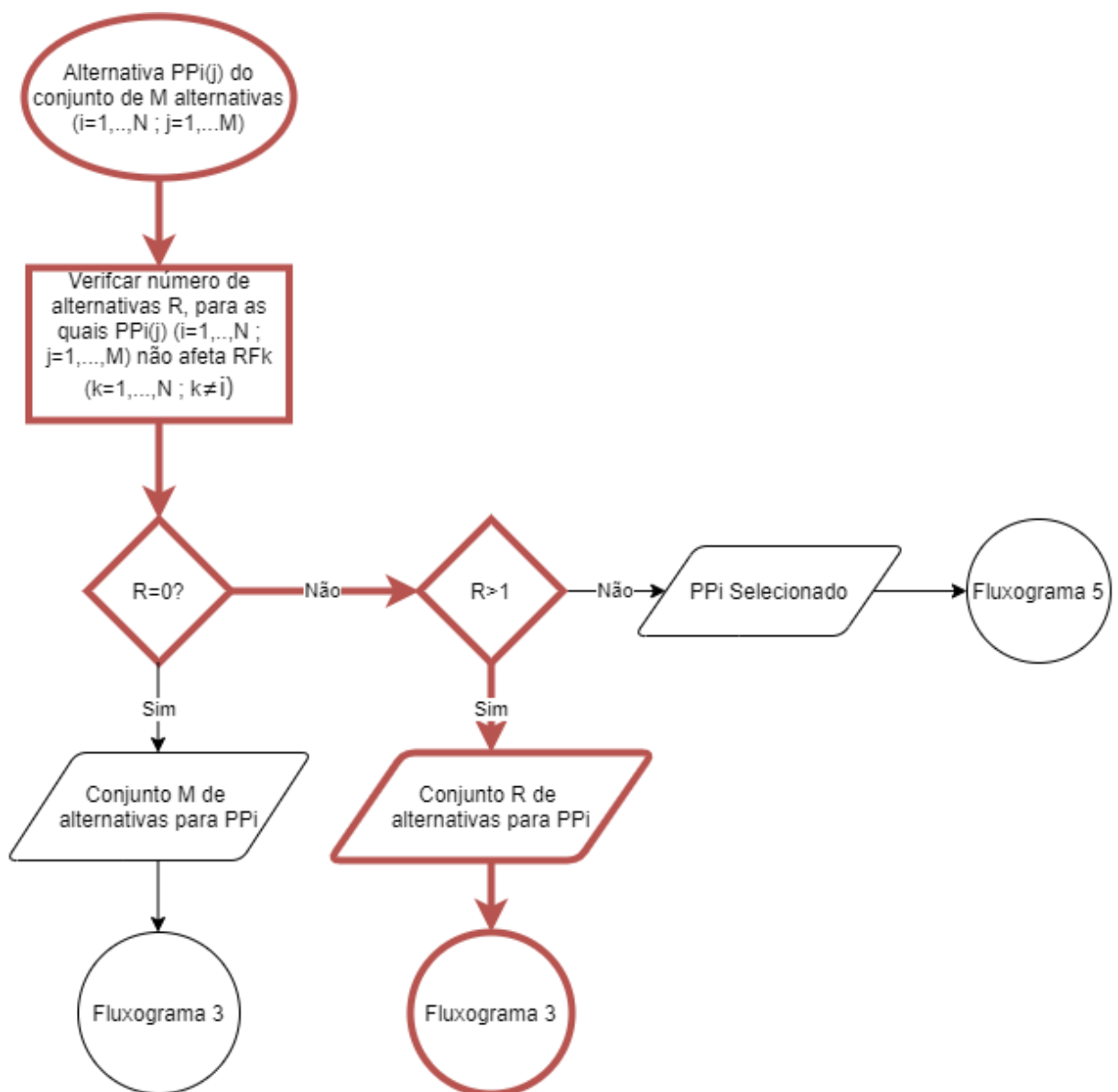


Figura 7.57 – Fluxograma 2, para a seleção de $PP_{1.2.1.1}$

Mantiveram-se todas as soluções como alternativas, uma vez que nenhuma delas afetavam o requisito funcional $RF_{1.2.1.2}$, passando a ter um conjunto R de soluções alternativas que passaram para a terceira etapa da metodologia representada na Figura 7.58.

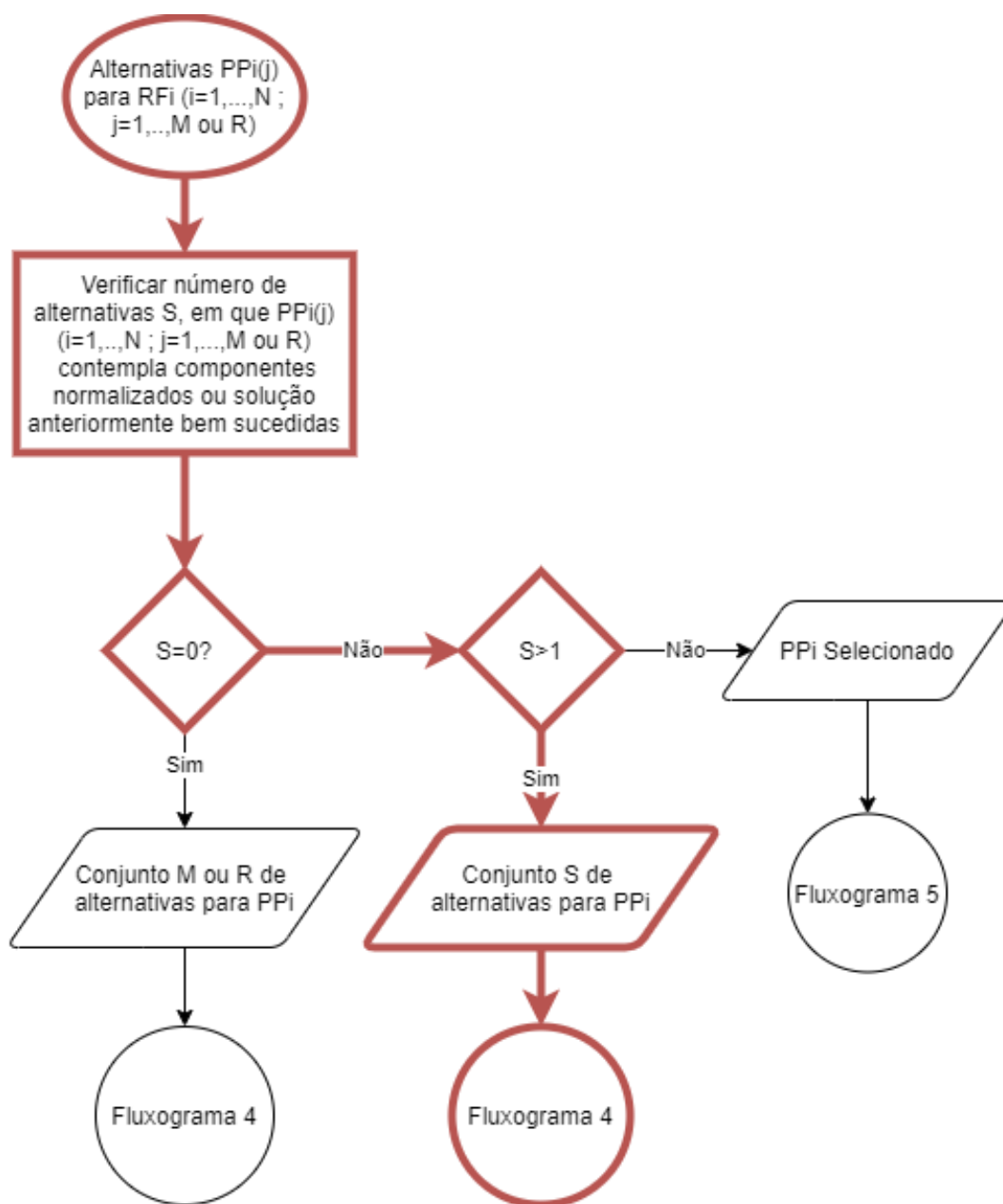


Figura 7.58 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.2.1.1}$

Todas as soluções consideravam a utilização de componentes normalizados, passando assim para a 4ª etapa da Metodologia, analisando os graus de conflito com os constrangimentos como representado na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Análise do grau de conflito das soluções alternativas para $RF_{1.2.1.1}$ com os constrangimentos

$RF_{1.2.1.1}$	Soluções Alternativas		
Criar Movimento Linear	$PP_{1.2.1.1(1)}$	$PP_{1.2.1.1(2)}$	$PP_{1.2.1.1(3)}$
	Dois atuadores lineares pneumáticos	Sistema de cremalheiras e roda dentada com acionamento por motor-reductor elétrico	Sistema articulado com acionamento por atuador linear pneumático
Constrangimentos	Grau de conflito		
C_3 Dimensões máximas da Carga	1	0	2
C_8 Tempo de ciclo máximo	0	1	0
C_{11} Espaço disponível nas instalações do cliente para implementação da solução	0	0	1
$PP_{1.3.1}$ Sistema com diferencial de corrente elétrica	1	2	3
Σ	2	3	6

O sistema de cremalheira e roda dentada com acionamento por motor elétrico, $PP_{1.2.1.1(2)}$, poderia ser mais complexo de desenvolver face ao constrangimento do tempo de ciclo, C_8 , uma vez que teria que ser encontrada a relação entre o diâmetro da roda dentada, a relação de transmissão do reductor do motor e o binário de saída que assegura-se a velocidade linear necessária das pinças. Poderiam ainda existir dificuldades acrescidas para encontrar uma solução que fosse compacta o suficiente, ao contrário das outras duas soluções que consideravam um atuador linear pneumático. Nesta apenas tinha que ser definido o diâmetro do êmbolo, a pressão de ar necessária para deslocar as pinças e o caudal de entrada de ar na camisa do atuador para definir a velocidade de deslocamento das pinças. Em relação ao conflito com as soluções já definidas, a solução $PP_{1.2.1.1(2)}$ poderia ser menos compacta, como já referido, podendo dificultar a interface com o sistema de elevação com diferencial de corrente elétrica, $PP_{1.3.1}$. A solução do sistema articulado com acionamento por atuador linear pneumático, $PP_{1.2.1.1(3)}$, que também se previa menos compacta que a solução que considerava dois atuadores lineares pneumáticos $PP_{1.2.1.1(1)}$. Assim sendo a solução $PP_{1.2.1.1(1)}$ apresentava um grau de conflito menor com os constrangimentos sendo a selecionada, em que esta etapa da metodologia está representada na Figura 7.59.

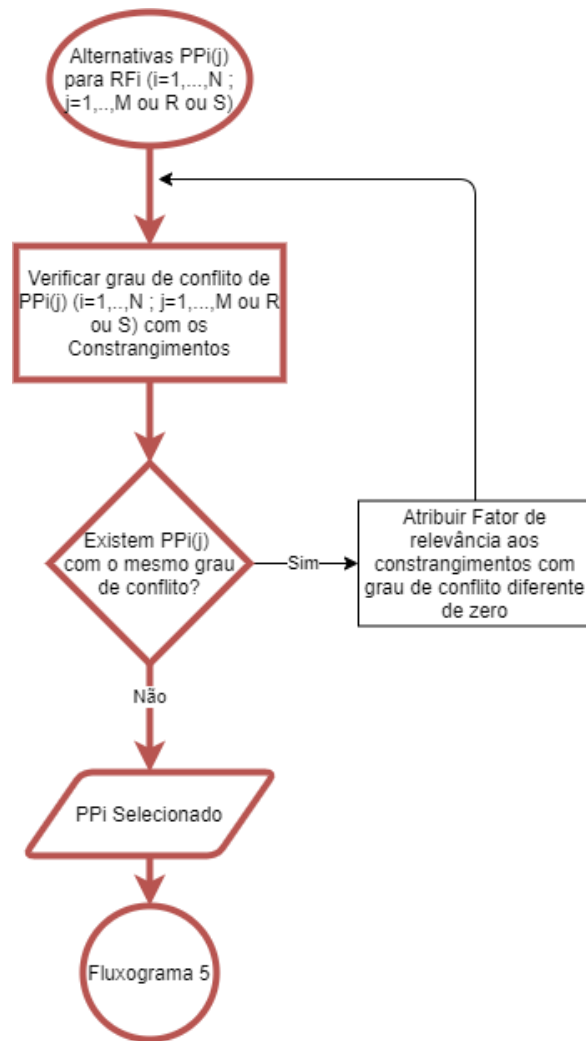


Figura 7.59 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.2.1.1}$

Para guiar o movimento linear, $RF_{1.2.1.2}$, foi considerada a alternativa de guiar o movimento através de um sistema de roletes, $PP_{1.2.1.2(1)}$, ou através de rolamentos lineares, $PP_{1.2.1.2(2)}$, sendo representada a primeira etapa da metodologia pela Figura 7.60.

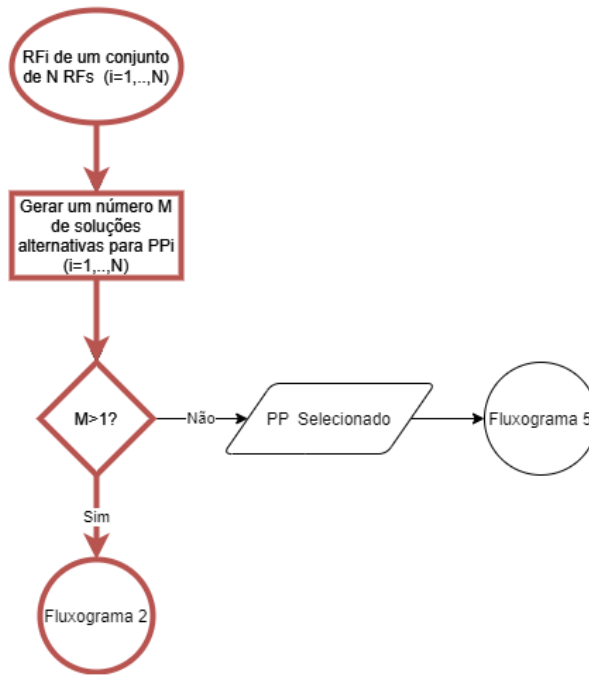


Figura 7.60 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.2.1.2}$

Foram então avaliadas na 2ª etapa, se existiam soluções que afetassem $RF_{1.2.1.1}$, como representado na Figura 7.61.

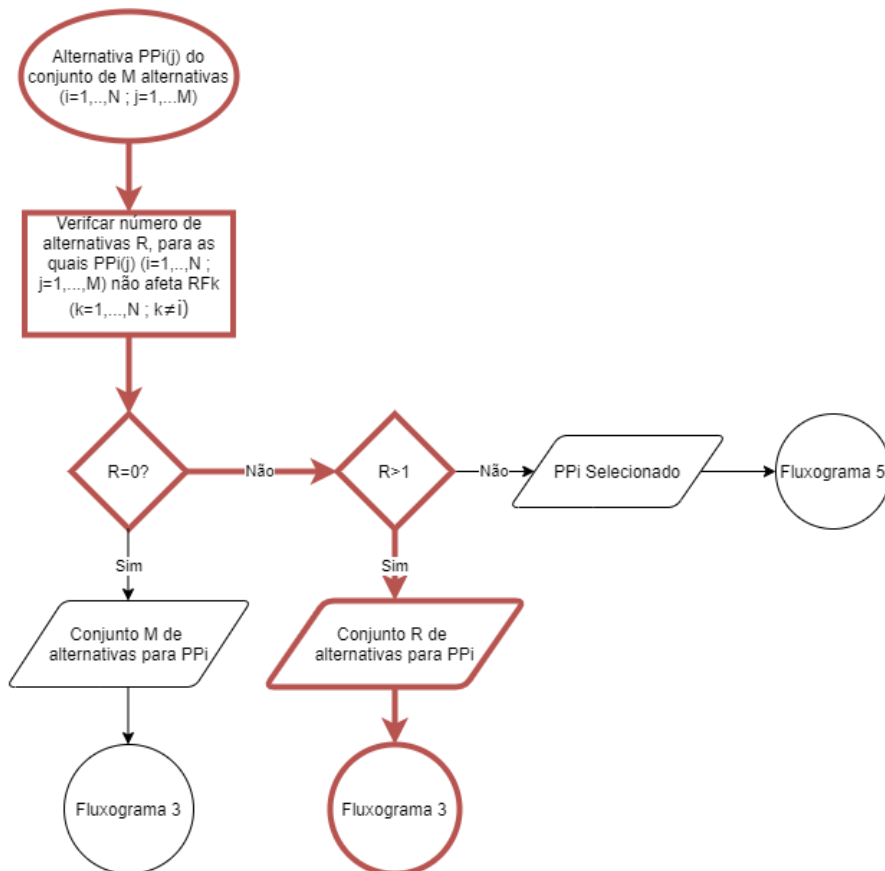


Figura 7.61 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1.2.1.2}$

Ambas as solução não afetavam $RF_{1.1.2.1}$, mantendo-se ambas como alternativa e passando para a terceira etapa de seleção representada na Figura 7.62.

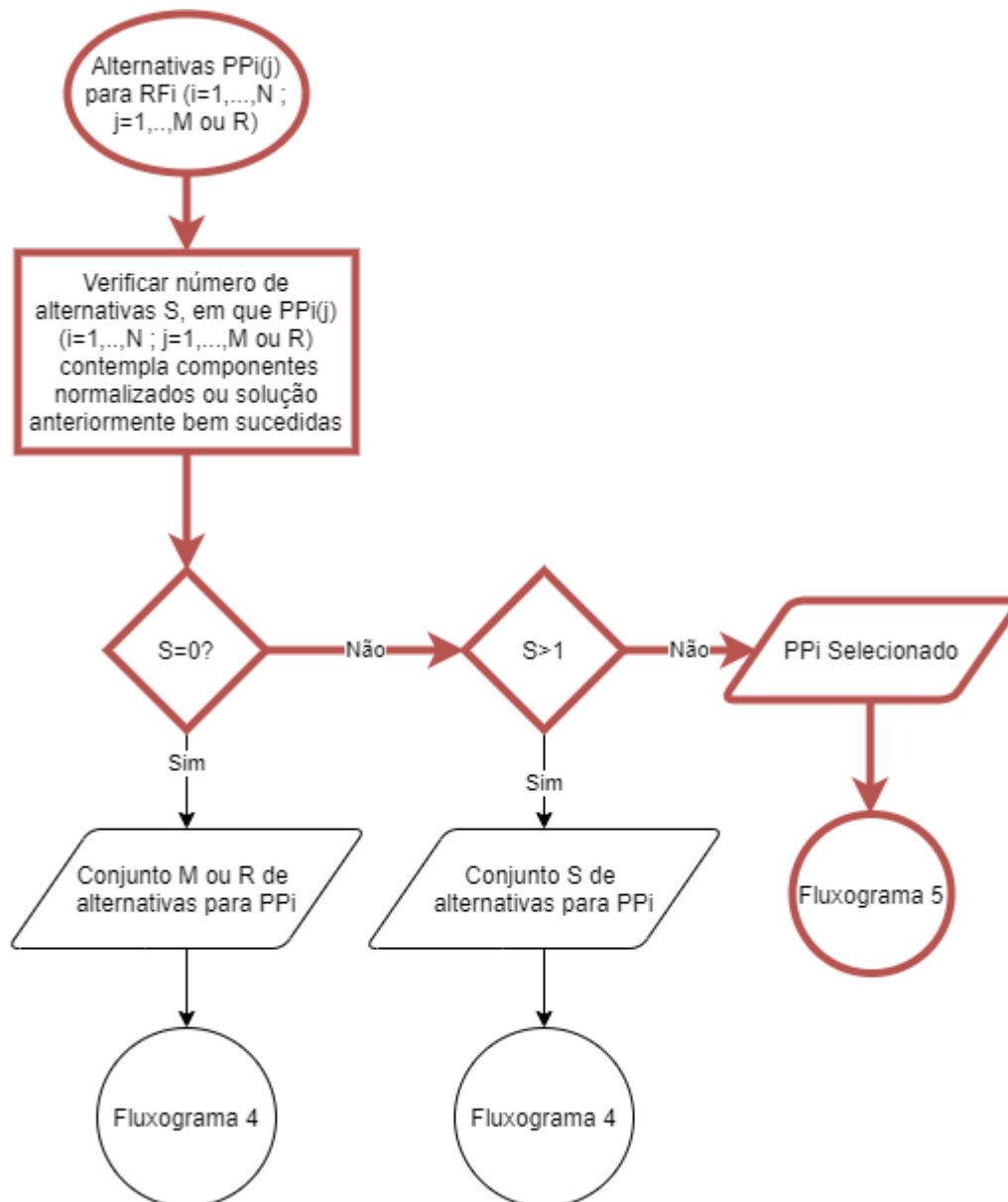


Figura 7.62 - Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.2.1.2}$

Uma vez que a solução dos rolamentos lineares contemplava a utilização de um componente normalizado, este foi o parâmetro de projeto selecionado.

Para o sistema com diferencial de corrente elétrico, $PP_{1.3.1}$, responsável pelo movimento vertical das pinças, necessitava-se que este se posicionasse corretamente para a recolha e para a libertação da carga. Para isso teria que se garantir precisão na paragem do movimento e eliminar as oscilações do sistema, ou seja, guiar o movimento linear, portanto os requisitos seriam:

- $RF_{1.3.1.1}$ Garantir precisão na paragem do movimento;
- $RF_{1.3.1.2}$ Guiar movimento linear.

Para garantir a precisão na paragem do movimento, $RF_{1.3.1.1}$, uma vez que a solução para o movimento era um diferencial elétrico de corrente, para ter uma paragem precisa, seria necessário ter uma velocidade baixa antes do ponto de paragem. Contudo, ter uma velocidade baixa durante todo o curso do movimento poderia comprometer o tempo de ciclo requisitado. Assim sendo, a solução definida, ilustrada na Figura 7.63, foi ter o diferencial elétrico de corrente com duas velocidades controladas por fins de curso, $PP_{1.3.1.1}$.

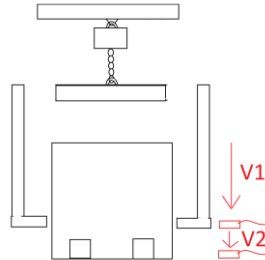


Figura 7.63 - Ilustração da solução $PP_{1.3.1.1}$.

Para esta requisito funcional não foram consideradas alternativas, sendo a primeira etapa da metodologia pela Figura 7.64.

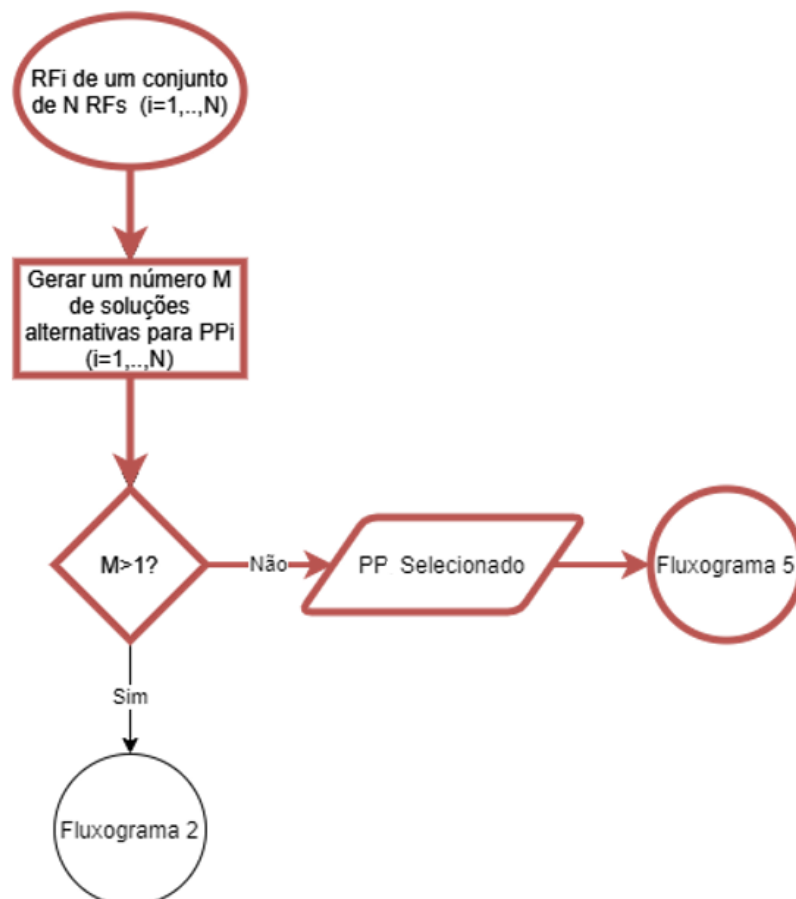


Figura 7.64 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.3.1.1}$

Para guiar o movimento linear, $RF_{1.3.1.2}$, colocou-se novamente a hipótese de ter um sistema de roletes, $PP_{1.3.1.2(1)}$, ou de guiar o movimento através de rolamentos lineares, $PP_{1.3.1.2(2)}$, ambas as soluções ilustradas na Figura 7.65. O procedimento de seleção foi idêntico ao de $PP_{1.1.2.2}$, tendo sido selecionado para guiar o movimento a solução dos rolamentos lineares, por considerar a utilização de um componente normalizado.



Figura 7.65 - Ilustração das soluções alternativas para $RF_{1.3.1.2}$

Para o sistema de movimento horizontal com motor fixo, $PP_{1.3.2}$, teria que ser definida a forma como se transmitira movimento linear ao conjunto móvel através do motoredutor e como seria guiado o movimento deste conjunto. Também, devido à necessidade de um posicionamento preciso das pinças para a recolha, seria necessário que o movimento horizontal realizasse paragens precisas. Foram considerados os seguintes requisitos funcionais:

- $RF_{1.3.2.1}$ Transmitir movimento linear ao conjunto móvel;
- $RF_{1.3.2.2}$ Guiar Movimento Linear;
- $RF_{1.3.2.3}$ Parar movimento com precisão.

Para transferir o movimento do moto-redutor para o conjunto móvel foi definido um sistema de polias e correia dentada, $PP_{1.3.2.1}$, não tendo sido consideradas soluções alternativas, podendo ser representada a primeira etapa da metodologia pela Figura 7.66.

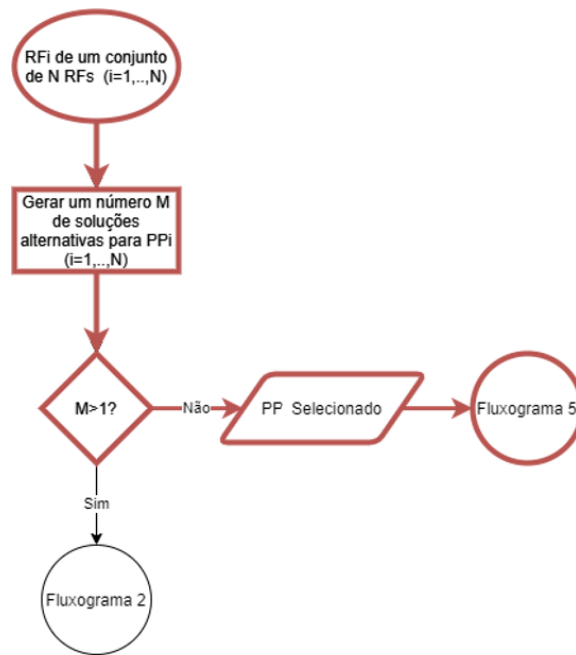


Figura 7.66 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.3.2.1}$

Para guiar o movimento linear do conjunto, $RF_{1.3.2.2}$, optou-se mais uma vez por fazê-lo através de rolamentos lineares, $PP_{1.3.2.2}$, seguindo o mesmo caminho de seleção para os parâmetros de projeto para os requisitos funcionais anteriores, idênticos a este.

Para parar o movimento com precisão, $RF_{1.3.2.3}$, foram consideradas as seguintes hipóteses, um motor elétrico com freio eletromagnético atuado por indicação de fins de curso, $PP_{1.3.2.3(1)}$, e um motor com variação de velocidade controlado por indicação de fins de curso $PP_{1.3.2.3(2)}$, podendo ser a primeira etapa de metodologia está representada na Figura 7.67.

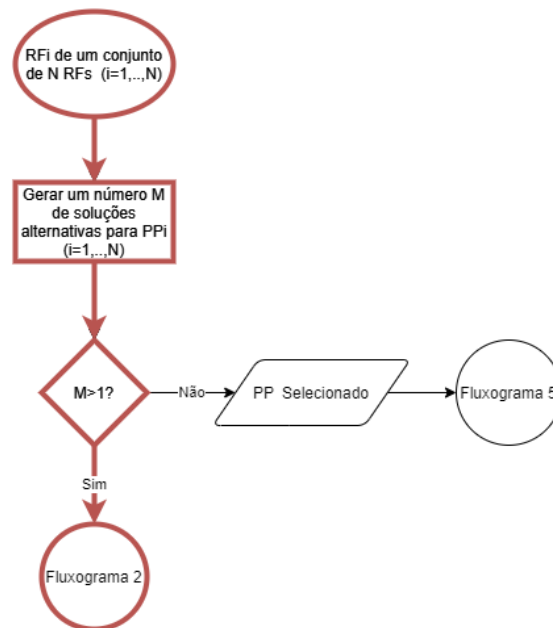


Figura 7.67 – Fluxograma 1 para a seleção de $PP_{1.3.2.3}$

Passando para a segunda etapa da metodologia, a mesma pode ser representada pela Figura 7.68.

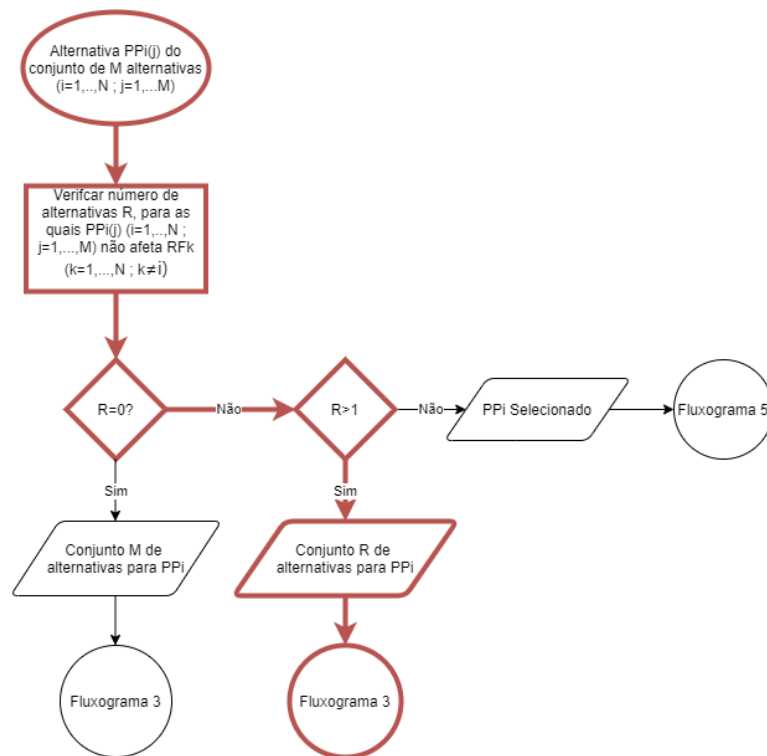


Figura 7.68 – Fluxograma 2 para a seleção de $PP_{1.3.2.3}$

Ambas as soluções não afetariam os restantes requisitos funcionais, mantendo-se como alternativas e passando para a 3ª etapa da metodologia representada na Figura 7.69.

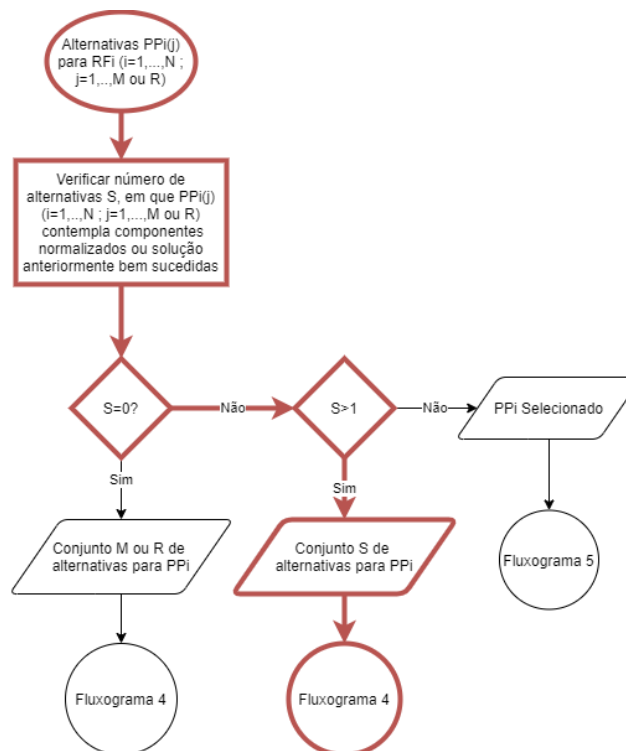


Figura 7.69 – Fluxograma 3 para a seleção de $PP_{1.3.2.3}$

Novamente, ambas as soluções apresentavam a utilização de componentes normalizados, permanecendo como alternativas e sendo assim analisados os graus de conflito com os constrangimentos, representado na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 - Análise do grau de conflito das soluções alternativas para $RF_{1.3.2.3}$ com os constrangimentos

$RF_{1.3.2.3}$	Soluções Alternativas	
Parar o movimento com precisão	$PP_{1.3.2.3(1)}$	$PP_{1.3.2.3(2)}$
	Motor elétrico com freio eletromagnético atuado por indicação de fins de curso	Motor com variação de velocidade controlado por indicação de fins de curso
Constrangimentos	Grau de Conflito	
C_8 Tempo de ciclo máximo	1	0
Σ	1	0

Em caso de necessidade de movimentar a carga com velocidades mais elevadas para cumprir o tempo de ciclo, o $PP_{1.3.2.3(1)}$, poderia apresentar problemas com a travagem, pois poderia resultar em esforços elevados sobre componentes do sistema, assim como poderia representar um risco para o transporte da carga, apresentando portanto um maior grau de conflito com o constrangimento do tempo de ciclo. Assim sendo, a solução escolhida foi $PP_{1.3.2.3(2)}$, sendo esta etapa da metodologia representada pela Figura 7.70.

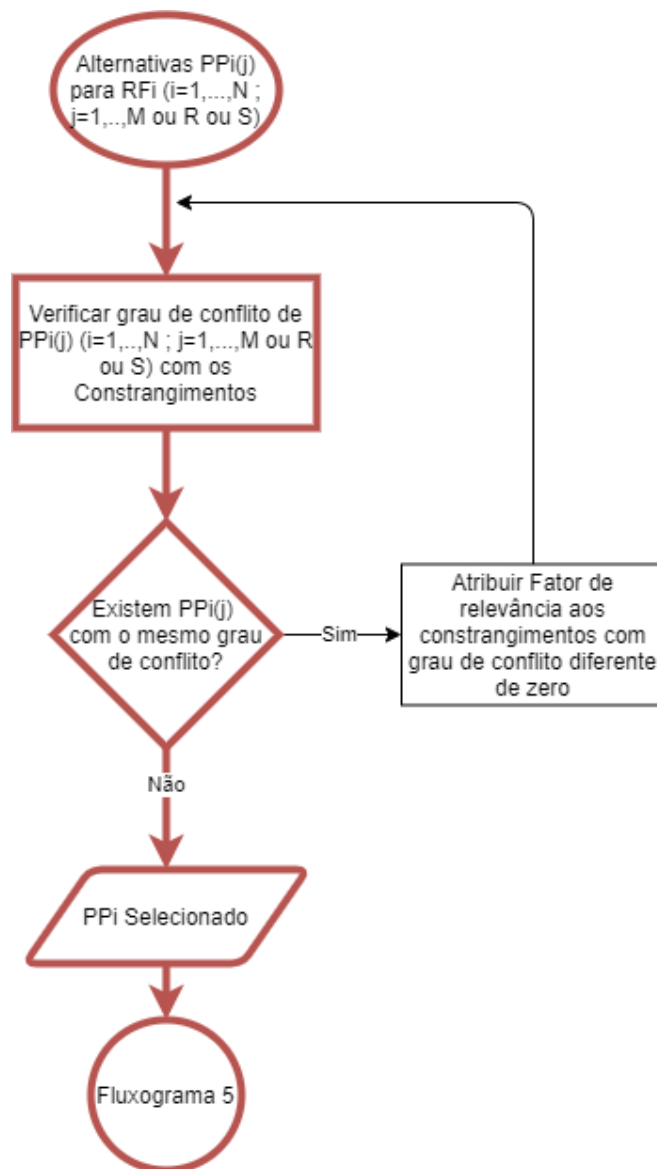


Figura 7.70 – Fluxograma 4 para a seleção de $PP_{1.3.2.3}$

7.6.2. Etapa 5 - Verificação dos constrangimentos entre PPs

Nesta fase, a decomposição da solução no domínio funcional apresenta-se na Figura 7.71, e no domínio físico na Figura 7.72.

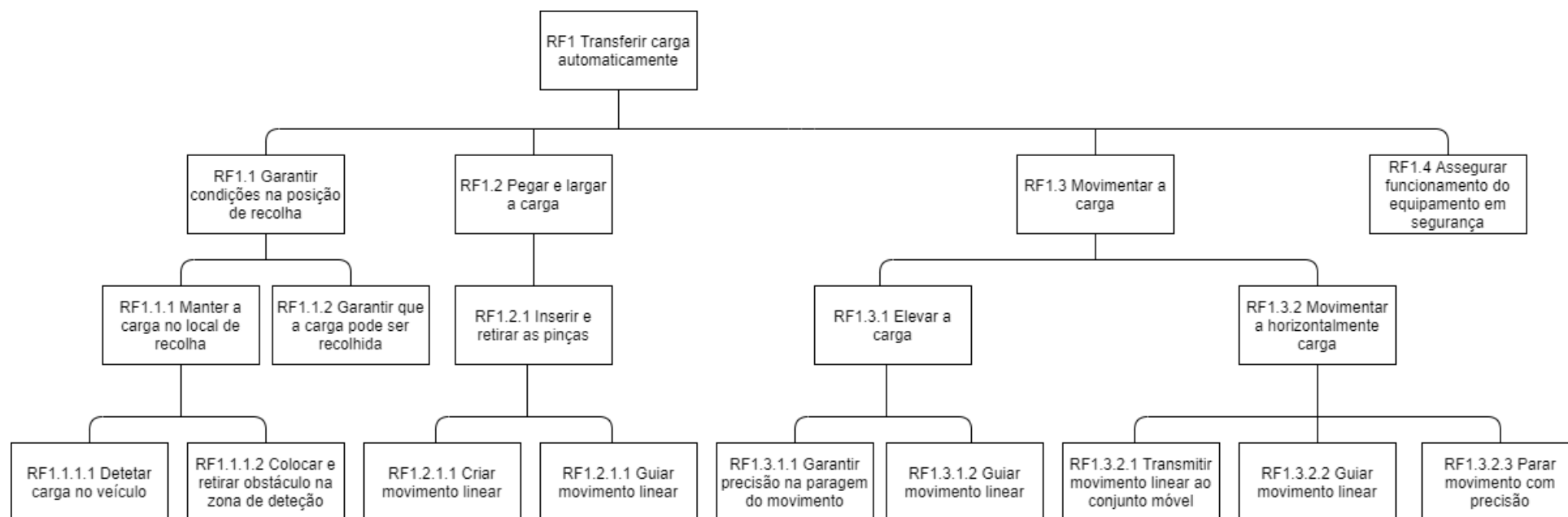


Figura 7.71 – Terceiro nível de decomposição dos requisitos funcionais

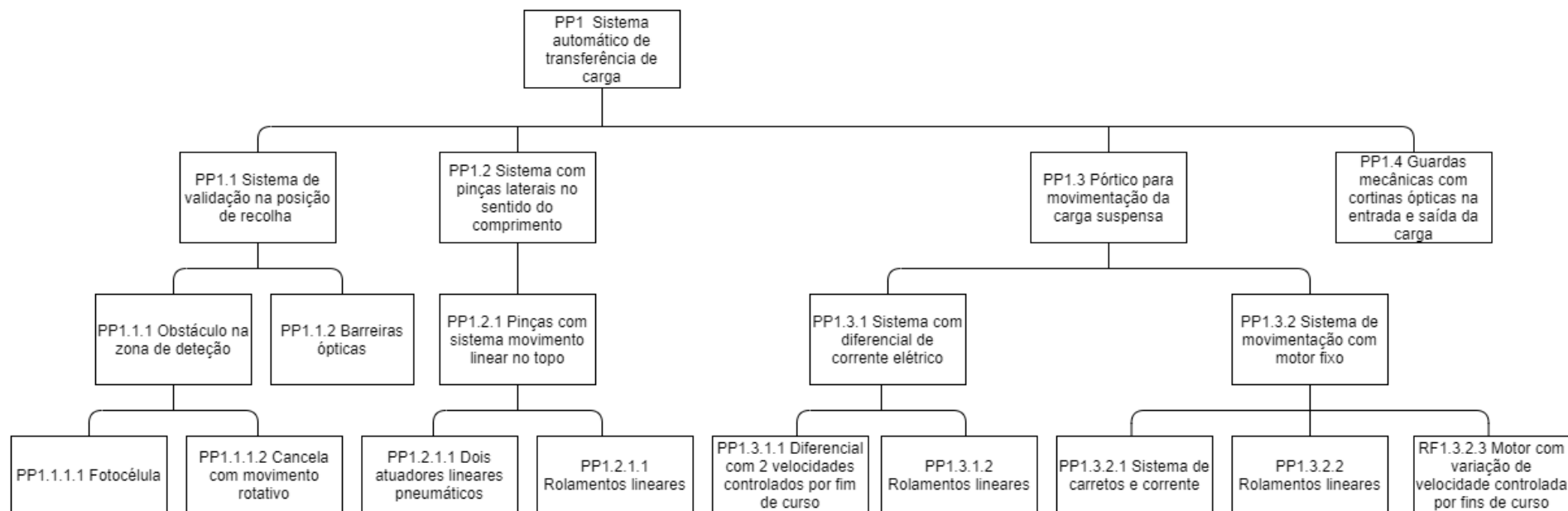


Figura 7.72 - Terceiro nível de decomposição dos parâmetros de projeto

Para validar, finalmente, o conjunto de *PPs* selecionados foi então feita a matriz de constrangimentos apresentada na Tabela 7.12.

Tabela 7.12 - Matriz de constrangimentos entre *PPs* do terceiro nível de decomposição

	$PP_{1.1.1.1}$	$PP_{1.1.1.2}$	$PP_{1.2.1.1}$	$PP_{1.2.1.2}$	$PP_{1.3.1.1}$	$PP_{1.3.1.2}$	$PP_{1.3.2.1}$	$PP_{1.3.2.2}$	$PP_{1.3.2.3}$
$PP_{1.1.1.1}$	-	0	0	0	0	0	0	0	0
$PP_{1.1.1.2}$	0	-	0	0	0	0	0	0	0
$PP_{1.2.1.1}$	0	0	-	0	0	0	0	0	0
$PP_{1.2.1.2}$	0	0	0	-	0	0	0	0	0
$PP_{1.3.1.1}$	0	0	0	0	-	0	0	0	0
$PP_{1.3.1.2}$	0	0	0	0	0	-	0	0	0
$PP_{1.3.2.1}$	0	0	0	0	0	0	-	0	0
$PP_{1.3.2.2}$	0	0	0	0	0	0	0	-	0
$PP_{1.3.2.3}$	0	0	0	0	0	0	0	0	-

Como se pode verificar na Tabela 7.12 não existiam constrangimentos entre os parâmetros de projeto, sendo que pelo fluxograma 5 da metodologia, esta fase de validação da metodologia pode ser representada pela Figura 7.73.

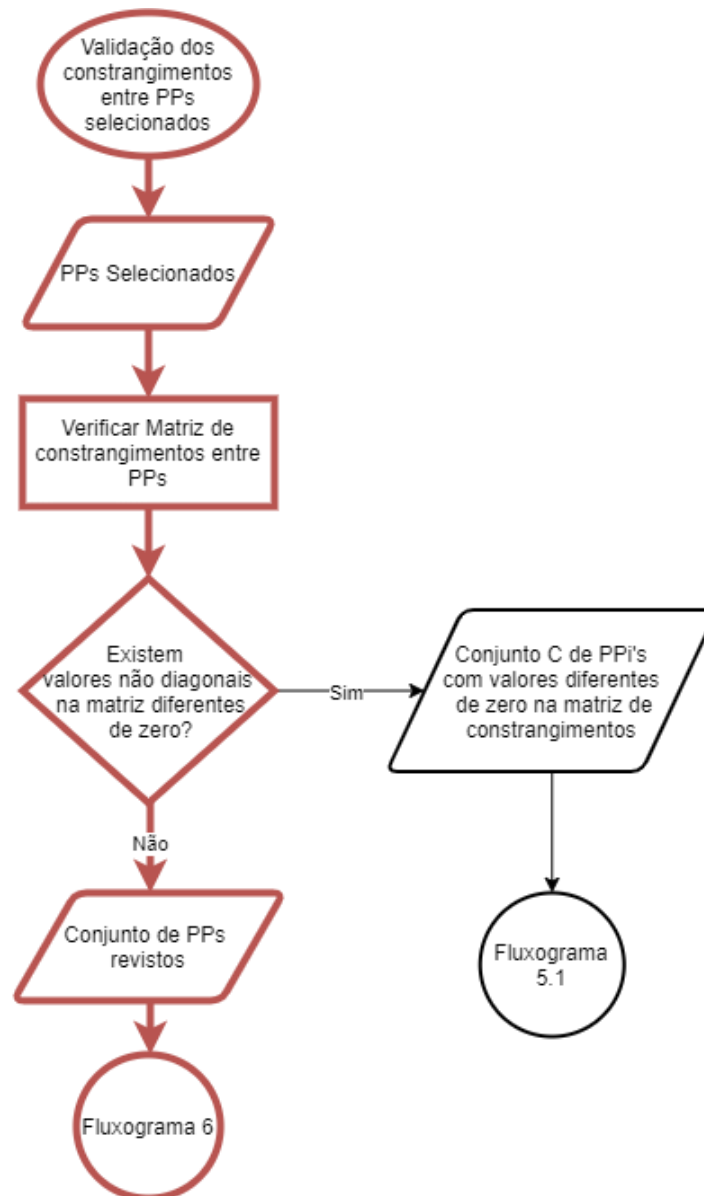


Figura 7.73 – Fluxograma 5 para o terceiro nível de decomposição

Ficando assim o conjunto de *PPs* revistos e passando o mesmo para a próxima etapa de validação da metodologia.

7.6.3. Etapa 6 - Validação pelo 1º Axioma da TAP

Procede-se então à validação do conjunto de soluções definidas perante o primeiro axioma da TAP. Analisando as equações de projeto separadamente para cada Parâmetro de projeto decomposto, tem-se:

Para a decomposição de $PP_{1.1.1}$ a equação de projeto (7.5);

$$\begin{Bmatrix} RF_{1.1.1.1} \\ RF_{1.1.1.2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_{1.1.1.1} \\ PP_{1.1.1.2} \end{Bmatrix} \quad (7.5)$$

Para a decomposição de $PP_{1.2.1}$, a equação de projeto (7.6);

$$\begin{Bmatrix} RF_{1.2.1.1} \\ RF_{1.2.1.2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_{1.2.1.1} \\ PP_{1.2.1.2} \end{Bmatrix} \quad (7.6)$$

Para a decomposição de $PP_{1.3.1}$, a equação de projeto (7.7);

$$\begin{Bmatrix} RF_{1.3.1.1} \\ RF_{1.3.1.2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_{1.3.1.1} \\ PP_{1.3.1.2} \end{Bmatrix} \quad (7.7)$$

Para a decomposição de $PP_{1.3.2}$, a equação de projeto (7.8);

$$\begin{Bmatrix} RF_{1.3.2.1} \\ RF_{1.3.2.2} \\ RF_{1.3.2.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_{1.3.2.1} \\ PP_{1.3.2.2} \\ PP_{1.3.2.3} \end{Bmatrix} \quad (7.8)$$

Como se pode verificar pela primeira matriz de projeto, trata-se de um projeto desacoplável. O requisito $RF_{1.1.1.2}$ seria afetado pelo $PP_{1.1.1.1}$, uma vez que o obstáculo só iria ser colocado na zona de deteção do veículo quando a fotocélula detetasse carga na zona da recolha. Todas as restantes matrizes de projeto são desacopladas e, portanto, ficou validado o conjunto de PPs selecionados pelo primeiro axioma. O fluxo percorrido igual ao apresentado na Figura 7.74.

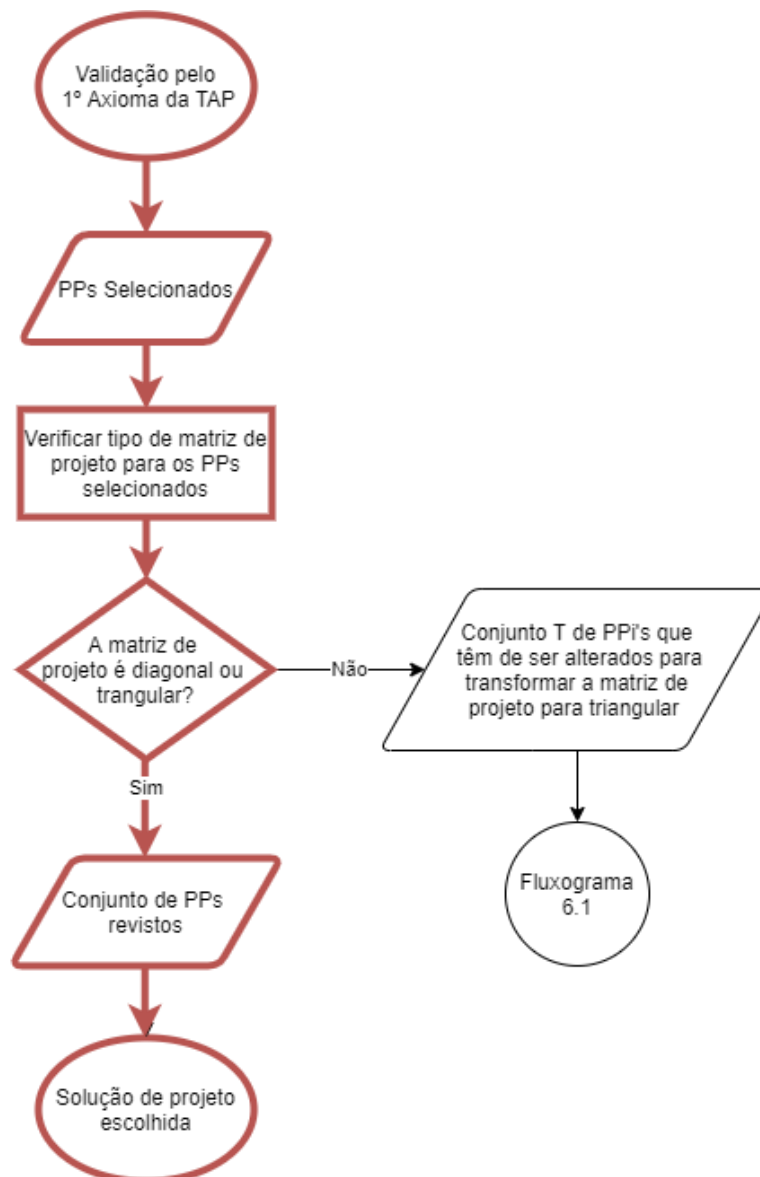


Figura 7.74 – Fluxograma 5 para o terceiro nível de decomposição

Assim, ficou definida a solução de projeto após esta etapa de validação do primeiro axioma. Alguns dos Parâmetros de projeto foram ainda decompostos e feito o processo de seleção de Parâmetros de Projeto pela metodologia proposta. Na Figura 7.75 apresenta-se o equipamento em fase de instalação no local de funcionamento.



Figura 7.75 – Equipamento instalado no local de funcionamento

Para a solução final a equação de projeto (7.9):

$$\begin{pmatrix} RF_1 \\ RF_{1.1} \\ RF_{1.2} \\ RF_{1.3} \\ RF_{1.4} \\ RF_{1.1.1} \\ RF_{1.1.2} \\ RF_{1.2.1} \\ RF_{1.3.1} \\ RF_{1.3.2} \\ RF_{1.1.1.1} \\ RF_{1.1.1.2} \\ RF_{1.2.1.1} \\ RF_{1.2.1.2} \\ RF_{1.3.1.1} \\ RF_{1.3.1.2} \\ RF_{1.3.2.1} \\ RF_{1.3.2.2} \\ RF_{1.3.2.3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} PP_1 \\ PP_{1.1} \\ PP_{1.2} \\ PP_{1.3} \\ PP_{1.4} \\ PP_{1.1.1} \\ PP_{1.1.2} \\ PP_{1.2.1} \\ PP_{1.3.1} \\ PP_{1.3.2} \\ PP_{1.1.1.1} \\ PP_{1.1.1.2} \\ PP_{1.2.1.1} \\ PP_{1.2.1.2} \\ PP_{1.3.1.1} \\ PP_{1.3.1.2} \\ PP_{1.3.2.1} \\ PP_{1.3.2.2} \\ PP_{1.3.2.3} \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

A matriz de projeto apresentada na equação 7.9 resulta, naturalmente, da introdução das matrizes de projeto resultantes dos três níveis de decomposição da solução. Portanto, tendo sido obtida, do primeiro e segundo nível de decomposição, uma solução acoplada, ou seja, em que a matriz de projeto não possuía uma configuração diagonal ou triangular, o mesmo se verifica na matriz de projeto da equação 7.9. A presença de uma solução de projeto acoplada, deve-se às características do produto projetado. Sendo um sistema com requisito de funcionamento automático, existem muitas dependências nas funcionalidades do produto, estando as ações, ou seja, as funcionalidades do sistema, dependentes do estado dos diferentes parâmetros de projeto.

8. Conclusão

A existência de ferramentas que auxiliem o projetista nas decisões que têm de ser tomadas ao longo da atividade de projeto é essencial para garantir o sucesso do Projeto.

Além do processo de tomada de decisão, a aplicação de metodologias ao processo de projeto, estruturam e organizam o pensamento e permite a rastreabilidade das decisões tomadas, que é útil tanto para o projeto que possa estar a decorrer, como para projetos futuros.

Muitos dos critérios de seleção presentes das metodologias de projetos existentes são de aplicação complexa e muitas vezes pouco viáveis para o projeto de determinado tipo de produtos e para o mercado que se inserem.

A metodologia proposta apresenta vantagens por ser de uma aplicação simples e pode apresentar uma alternativa ao segundo critério de seleção da Teoria Axiomática de Projeto, o axioma da informação, quando para determinadas atividades de projeto a aplicação do mesmo é demasiado complexa, em particular, devido a falta de dados para cálculo do conteúdo de informação.

A presente metodologia propõe numa primeira fase a análise individual de cada requisito funcional e a seleção dos parâmetros de projeto para os mesmos. Esta abordagem evita a análise de várias soluções de projeto resultantes de todas as possíveis combinações entre os parâmetros de projeto alternativos, como sugere a Teoria axiomática de Projeto. Assim, a presente metodologia possibilita que se definam soluções de projeto num espaço de tempo mais curto.

Para projetistas menos experientes, esta abordagem pode também ser uma mais valia, uma vez que a tomada de decisão com base numa visão global do problema e da solução é um exercício mais complicado e que depende muito da experiência do projetista. Também nessa perspetiva, a metodologia proposta faz com que esse exercício seja feito numa fase de validação dos constrangimentos entre parâmetros de projeto selecionados, fazendo com que sejam analisadas as relações, principalmente as interfaces físicas, entre os parâmetros de projeto selecionados em cada nível de decomposição.

A avaliação desta relação entre Parâmetros de Projeto selecionados, assenta nos princípios de engenharia concorrente, uma vez que numa fase conceptual um dos critérios de seleção são os constrangimentos com os restantes Parâmetros de projetos selecionados estando assim presente a fase de incorporação do projeto. Esta abordagem pode reduzir a necessidade de iterações numa fase avançada do projeto, aos princípios de solução que foram inicialmente definidos.

Apesar das vantagens apresentadas, a presente proposta metodológica pode ainda ser alvo de melhorias, existindo alguns pontos que devem ser avaliados. Na presença de soluções alternativas com o mesmo grau de conflito, é proposto que seja atribuído um fator de relevância aos constrangimentos para que possa ser selecionado o Parâmetro de Projeto. Esta abordagem pode remeter para a questão de

numa primeira fase se estar a atribuir a mesma importância a todos os constrangimentos e se esse fator de relevância não deveria ser atribuído na primeira análise.

Na idealização da segunda etapa da metodologia, na qual se pretendem seleccionar parâmetros que não afetem os restantes requisitos funcionais do sistema, surgiu também a hipótese de se seleccionarem os parâmetros de projeto que afetassem o número mínimo de requisitos funcionais existentes, sendo que as soluções desacopladas seriam sempre a primeira opção proporcionando a independência da solução de projeto final, mas fazendo também com que a solução de projeto final apresenta-se menos dependências. Estaríamos assim a considerar que dentro de um conjunto de soluções alternativas desacopláveis, a melhor solução é que apresenta menos dependências. Este não se apresenta como um critério de seleção na Teoria Axiomática de Projeto, uma vez que no caso de existirem várias soluções alternativas de projeto desacopláveis, a mesma remete para a aplicação do Axioma da Independência para a seleção da solução.

No seguimento desta avaliação do trabalho realizado, podem ser sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Um método de recolha dos constrangimentos de entrada e dos constrangimentos do sistema, que vão surgindo ao longo da decomposição do problema, uma vez que esta identificação nem sempre é fácil numa fase ainda muito conceptual do projeto

- Um método para avaliação dos constrangimentos face ao problema e a atribuição de um fator de relevância a cada um destes

- Avaliação da possibilidade da utilização de um critério de seleção, com base no grau de dependência de soluções de projeto desacopláveis.

Bibliografia

- [1] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, KH. (2007) – “Engineering Design – A Systematic Approach” – Third Edition, 2007. (Primeira Edição Alemã, 1977 – Primeira Edição Inglesa, 1984). London : Springer-Verlag London, Translators and Editors – Wallace, Ken; Blessing, Luciënne. ISBN 978-1-84628-318-5.
- [2] SUH, N.P. (1990) – “The Principles of Design”, New York : Oxford University Press, 1990. ISBN 0-19-504345-6.
- [3] BARSALOU, L.W. (2017) - “Define Design Thinking,” *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation* 3, no. 2: 102–05
- [4] GABRIEL-SANTOS, A. (2010) – “O Projecto de Produtos Únicos Desenvolvidos em Empresas de Pequena Dimensão”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [5] DERELÖV, M. (2009) – “On Evaluation of Design Concepts-Modelling Approaches for Enhancing the Understanding of Design Solutions”, Doctoral dissertation, Department of Management and Engineering, Linköping studies in science and technology, Linköping, Sweden
- [6] SOHLENIUS, G. (1992) - "Concurrent engineering", *Ann CIRP* 41(2):645– 655
- [7] PETROVAN, A.; LOBONTIU, G.; RAVAI-NAGY, S. (2013) - “Broadening the Use of Product Development Ontology for One-off Products”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 371, pp. 878-882.
- [8] SUH, N. P. (1995) - “Axiomatic design of mechanical systems”, Special 50th Anniversary Combined Issue of the *Journal of Mechanical Design* and the *Journal of Vibration and Acoustics*, Transactions of the ASME 1995;17:1–10.
- [9] SUH, N. P. (1998) – “Axiomatic design theory for systems”, *Res Eng Des* 10:189–209
- [10] GUENOV, MD.; BARKER, SG. (2005) – “Application of axiomatic design and design structure matrix to the decomposition of engineering systems”. *Syst Eng* 8:29–40
- [11] COELHO, A. M. G.; MOURÃO, A. J. F. (2007) – “Axiomatic design as support for decision-making in a design for manufacturing context: A case study”, *International Journal of Production Economics*, 109(1–2), 81–89.

- [12] BANJIUL, F.; DRAGHIVIL, G. (2012) - “Product Functional Decomposition in Axiomatic and Systematic Design”, ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR 24-26 May 2012, Sinaia, Romania
- [13] GONÇALVES-COELHO, A. (2004) “Axiomatic Design and the Concurrent Engineering Paradigm”, In: Proc. of COSME, Brasov Roumanie
- [14] GUENOV, MD.; BARKER, SG. (2005) – “Application of axiomatic design and design structure matrix to the decomposition of engineering systems”. Syst Eng 8:29–40
- [15] ONARHEIM, B. (2012) – “Creativity from constraints in engineering design: Lessons learned at Coloplast”, Journal of Engineering Design, 23, 323–336.
- [16] LIN, L.; CHEN, L. C. (2002) – “Constraints Modeling in Product Design” , Journal of Engineering Design, 13(3): 205-214
- [17] HASHEMIAN, M.; GU, P. (1995) - “A constraint-based system for concurrent product design”, Concurrent Eng, Res. Applic. 3 (3): 177–186.

Corolários e Teoremas da TAP

Através dos dois Axiomas presentes Teoria Axiomática do Projeto, derivam Corolários e Teoremas que se revelam importantes e que devem estar presentes quando o processo de projeto é baseado na TAP.

Corolário 1: Desacoplamento de Projetos Acoplados

Desacoplar ou separar componentes ou características de uma solução se os Requisitos Funcionais forem acoplados, tornando-os interdependentes

Corolário 2: Minimização dos Requisitos Funcionais

Minimizar o número de Requisitos Funcionais e Constrangimentos

Corolário 3: Integração de Componentes Físicos

Integrar, num único componente, vários Parâmetros de Projeto, desde que se mantenha a independência dos Requisitos Funcionais

Corolário 4: Utilização de Normalização

Usar componentes normalizados ou intermutáveis, se forem compatíveis com os Requisitos Funcionais e com os Constrangimentos.

Corolário 5: Utilização de Simetria

Utilização de componentes com formas simétricas se for compatível com os Requisitos Funcionais e Constrangimentos.

Corolário 6: Maior Tolerância

Especificar Requisitos Funcionais com tolerâncias amplas.

Corolário 7: Projeto Desacoplado com Menos Informação

Procurar soluções desacopladas, que necessitam de menos informação para satisfazer os Requisitos Funcionais, do que soluções acopladas.

Corolário 9: Reangularidade efetiva de um escalar

A reangularidade efetiva R de uma matriz acolada escalar ou de um elemento é a unidade

Teoremas para Projeto Geral:

Teorema 1: Acoplamento devido a número insuficiente de PPs

Quando o número de PPs é menor que o número de RFs , ou estamos perante um projeto acoplado ou os RFs não podem ser satisfeitos.

Teorema 2: Desacoplamento de um Projeto Acoplado

Quando um projeto é acoplado devido a um número de RFs mais elevado do que o de PPs (i.e. $m > n$), o mesmo pode ser desacoplado pela adição de novas PPs para que o número de RFs e PPs seja igual e para se obter uma matriz triangular.

Teorema 3: Projeto Redundante

Quando existem mais PPs do que RFs , o projeto ou é redundante ou acoplado.

Teorema 4: Projeto Ideal

Num projeto ideal, o número de PPs é igual ao número de RFs .

Teorema 5: Necessidade de um Projeto Novo

Quando um determinado conjunto de RFs é alterado quer pela adição de um novo RF , quer pela substituição de um dos RFs por um novo ou pela seleção de um conjunto de RFs completamente diferente, a solução de projeto original, definida por um determinado conjunto de PPs , deixa de satisfazer o novo conjunto de RFs . Consequentemente, deve ser procurada uma nova solução de Projeto.

Teorema 6: Independência da Sequência de um Projeto Desacoplado

O conteúdo de informação de um projeto desacoplado é independente da sequência pela qual os PPs são alterados para satisfazer um determinado conjunto de RFs .

Teorema 7: Dependência da Sequência de Projetos Acoplados e Desacopláveis

O conteúdo de informação de um projeto acoplado e desacoplável é dependente da sequência pela qual os PPs são alterados para satisfazer um determinado conjunto de RFs

Teorema 8: Independência e Tolerância

Um projeto é desacoplável quando a tolerância definida pelo projetista é superior a:

$$\left(\sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial RF_i}{\partial PP_j} \Delta PP_j \right)$$

Neste caso os elementos não diagonais da matriz de projeto podem não ser considerados no projeto.

Teorema 9: Projeto para Fabrico

Para ser possível de fabricar um produto dentro das tolerâncias especificadas, o produto entre a matriz de projeto do produto, $[A]$ e a matriz do processo de produção $[B]$ deve resultar numa matriz diagonal ou triangular, ou seja, se $[A]$ ou $[B]$, representarem projetos acoplados, o produto não pode ser facilmente produzido dentro das tolerâncias especificadas, porque pequenas variações no processo produtivo, resultam em grandes variações nos RFs e nos PPs . Quando $[A]$ ou $[B]$ são matrizes triangulares, devem ser ambas triangulares superiores ou triangulares inferiores, para que o processo de produção satisfaça a independência dos requisitos funcionais.

Teorema 10: Modularidade das Medidas de Independência

Suponhamos que a matriz de projeto $[DM]$ pode ser dividida em matrizes quadradas que são diferentes de zero, ao longo de uma diagonal principal. Então a reangularidade e a semangularidade da $[DM]$ são iguais ao produto das suas respectivas medidas por cada submatriz diferente de zero.

Teorema 10a: Reangularidade e Semangularidade para Projeto Desacopláveis

Quando a semangularidade e a reangularidade são iguais, o projeto é acoplado.

Teorema 11: Invariância

A reangularidade e a semangularidade de uma matriz de projeto $[DM]$ são invariantes segundo ordenações alternativas das variáveis dos RFs e dos PPs , desde que as ordenações preservem a associação de cada RF com o respetivo PP .

Teorema 12: Soma da Informação

A soma da informação para um conjunto de eventos também é informação, desde que as probabilidades condicionais adequadas sejam usadas quando os eventos não são estatisticamente independentes.

Teorema 13: Conteúdo de informação de um sistema completo

Se cada PP é estatisticamente independente dos outros PPs , o conteúdo de informação de um sistema completo é a soma da informação de todos os eventos individuais associados ao conjunto de RFs que devem ser satisfeitos.

Teorema 14: Conteúdo de informação de Projeto Acoplados Versus Projetos Desacoplados

Quando o estado dos *RFs* são alterados de um estado para outro no domínio funcional, a informação necessária para esta alteração é maior para um processo acoplado do que para um processo desacoplado.

Teorema 15: Interface entre Projeto e Produção

Quando o sistema de produção compromete a independência dos *RF* do produto, ou o projeto do produto deve ser alterado ou deve ser utilizado um novo processo de produção para manter a independência dos *RF* do produto.

Teorema 16: Igualdade do Conteúdo de Informação

Os conteúdos de informação que são relevantes para a tarefa de projeto são igualmente importantes independentemente da sua origem física, e nenhum fator de ponderação deve ser aplicado aos mesmos.

Teorema 17: Projeto na Ausência de Informação Completa

O projeto pode continuar mesmo na ausência de informação completa, apenas em projetos desacoplados em que a informação em falta é relacionada com elementos fora da diagonal da matriz de projeto.

Teorema 18: Importância das Decisões nos Níveis mais Altos

A qualidade do projeto depende da seleção dos *RFs* e do mapeamento entre os domínios. Escolhas incorretas dos *RFs* feitas aos níveis mais altos dos domínios de projeto, não podem ser retificadas através das decisões feitas aos níveis mais baixos.